



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Reaktorentwicklung

**Temperaturabhängigkeit
der Körperschalldämpfung
in einem Dampferzeugerrohr
(Incoloy 800)**

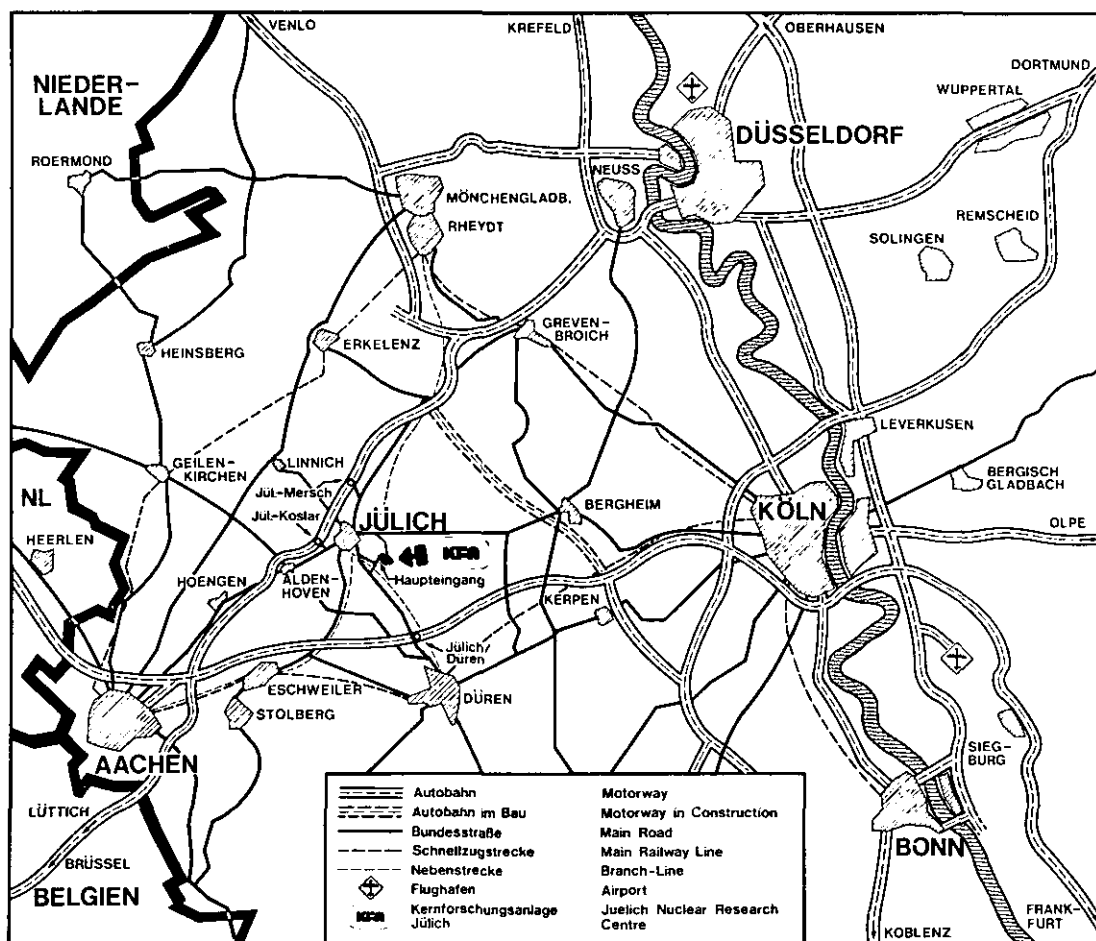
von

K. Schmidt

Jül - Spez - 103

März 1981

ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 103

Institut für Reaktorentwicklung Jül - Spez - 103

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich 1 (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: (02461) 61-0 · Telex: 833556 kfa d

Temperaturabhängigkeit der Körperschalldämpfung in einem Dampferzeugerrohr (Incoloy 800)

von

K. Schmidt

TEMPERATURE DEPENDANCE OF ACOUSTIC
ATTENUATION IN A STEAM GENERATOR
PIPE (INCOLOY 800)

by

K. Schmidt

ABSTRACT

Measurements of the temperature and frequency dependance of acoustic attenuation in a steam generator pipe (Incoloy 800) are reported.

Kernforschungs-
anlage Jülich
GmbH IRE

Jül-Spez-103

März 1981

TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER
KÖRPERSCHALLDÄMPFUNG IN EINEM
DAMPFERZEUGERROHR
(INCOLOY 800)

von

K. Schmidt

KURZFASSUNG

Es wird über Messungen berichtet, in denen die temperatur- und frequenzabhängige Dämpfung von Körperschall in einem Dampferzeugerrohr (Incoloy 800) bestimmt wurde.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. BESTIMMUNG DES ABSOLUTWERTES DER ULTRASCHALLDÄMPFUNG BEI RAUMTEMPERATUR	3
2.1 Versuchsaufbau	3
2.1.1 Meßstrecke	4
2.1.2 Ultraschallquelle	4
2.1.3 Dämpfungsstrecke	7
2.1.4 Schalldetektor	9
2.1.5 Elektronischer Teil	11
2.2 Versuchsdurchführung	12
2.3 Meßergebnisse	15
3. BESTIMMUNG DER TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER KÖRPERSCHALLDÄMPFUNG	21
3.1 Versuchsaufbau	21
3.1.1 Meßstrecke	21
3.1.2 Schallquelle	22
3.1.3 Dämpfungsstrecke	23
3.1.4 Schalldetektoren	23
3.1.5 Elektronischer Teil	23
3.2 Versuchsdurchführung	23
3.3 Meßergebnisse	26
3.3.1 Messungen am Rohranfang	26
3.3.2 Messungen am Rohrende	30

1. EINLEITUNG

Ein aus einem Leck ausströmendes Fluid erzeugt Schallenergie im hörbaren und im Ultraschallbereich. Diese Schallenergie tritt in der Umgebung des Lecks nicht nur als Gasschall auf, sondern ein Teil der Energie pflanzt sich auch in dem festen Körper, in dem sich das Leck befindet, als Körperschall fort. Folglich besteht die Möglichkeit, Ausströmvorgänge sowohl durch die Messung des Gasschalls als auch des Körperschalls nachzuweisen.

Damit stellt sich die Frage, ob diese Schallsignale als Meßgröße eines diversitären Leckdetektionssystems innerhalb eines HTR-Dampferzeugers neben der Feuchte- und Druckmessung dienen können.

Wird der Gasschall gemessen, so lassen sich mit einem einzigen Detektor Lecks innerhalb eines größeren Bereichs detektieren, bei der Messung des Körperschalls beschränkt sich die Detektion in erster Linie nur auf das spezielle Bauteil, an dem sich der Detektor befindet, bietet aber dadurch die Möglichkeit, das Leck diesem speziellen Bauteil zuzuordnen. Der Gedanke an eine Einzelinstrumentierung von Dampferzeugerrohren bzw. von mehreren zu einer Gruppe zusammengefaßten Rohren liegt nahe. Dies führt jedoch zu einem wesentlich höheren Instrumentierungsaufwand als bei einer Gasschallmessung.

Der technische Aufwand bei einer Rohrüberwachung vermittelt Körperschallmessung wird durch die Höhe der Signalschwächung entscheidend beeinflußt. Bei starker Schwächung sinkt die "Reichweite" eines Detektors, d.h. der maximale Abstand, in welchem sich ein Leck bestimmter Größe vom Detektor befinden darf, damit das von dort ausgehende Signal noch am Ort des Detektors einen minimal zu fordernden Abstand vom Störpegel hat.

Die Schwächung der Körperschallwellen wird durch folgende Faktoren bestimmt:

1. die Dämpfung der Schallwellen auf ihrem Weg durch das Rohrmaterial durch Umwandlung von Schallenergie in Wärmeenergie,

2. die Verzweigung der Schallwellen an Rohrhalterungen und eine dadurch bedingte Ableitung von Schallenergie auf Stützen, Dampferzeugereinbauten bzw. Druckhalter etc.,
3. die Schwächung der Schallwellen infolge räumlicher Ausbreitung.

Die unter Punkt 3 aufgeführte Schwächung der Körperschallwellen ist in einem Dampferzeuger zu vernachlässigen, da man oberhalb eines Abstandes von der Schallquelle, der in der Größenordnung des Rohrdurchmessers liegt, von "geführten" Wellen sprechen kann, die keiner geometrischen Schwächung mehr unterliegen.

Um Daten über die Größe der unter Punkt 1 und 2 genannten Phänomene zu gewinnen, werden entsprechende Experimente am Dampferzeuger der Anlage EVA II /1/ durchgeführt. Zwangsläufig führen diese Versuche aber nur zu Aussagen über den gemeinsamen Einfluß beider Schwächungsfaktoren, da im realen Dampferzeuger eine getrennte Messung nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurde in Laborversuchen die unter Punkt 1 aufgeführte reine Dämpfung bestimmt. Dazu wurden zwei getrennte Experimente durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurde der Absolutwert der Dämpfung bei Raumtemperatur gemessen. Die Ergebnisse sind unter Punkt 2 dargestellt. In einem zweiten Experiment wurde die relative Änderung der Dämpfung mit steigender Temperatur ermittelt, worüber unter Punkt 3 referiert wird.

2. BESTIMMUNG DES ABSOLUTWERTES DER ULTRASCHALLDÄMPFUNG BEI RAUMTEMPERATUR

2.1 Versuchsaufbau

In der Abb. 1 ist schematisch der Versuchsaufbau dargestellt, der sich in einen mechanischen Teil, bestehend aus Meßstrecke, Schallquelle und Dämpfungsstrecke, und einen elektronischen Teil, bestehend aus Verstärker, Bandfilter, Spektrum-Analysator und RMS-Voltmeter, gliederte. Das Bindeglied zwischen dem mechanischen und elektronischen Teil bildete der Schallaufnehmer.

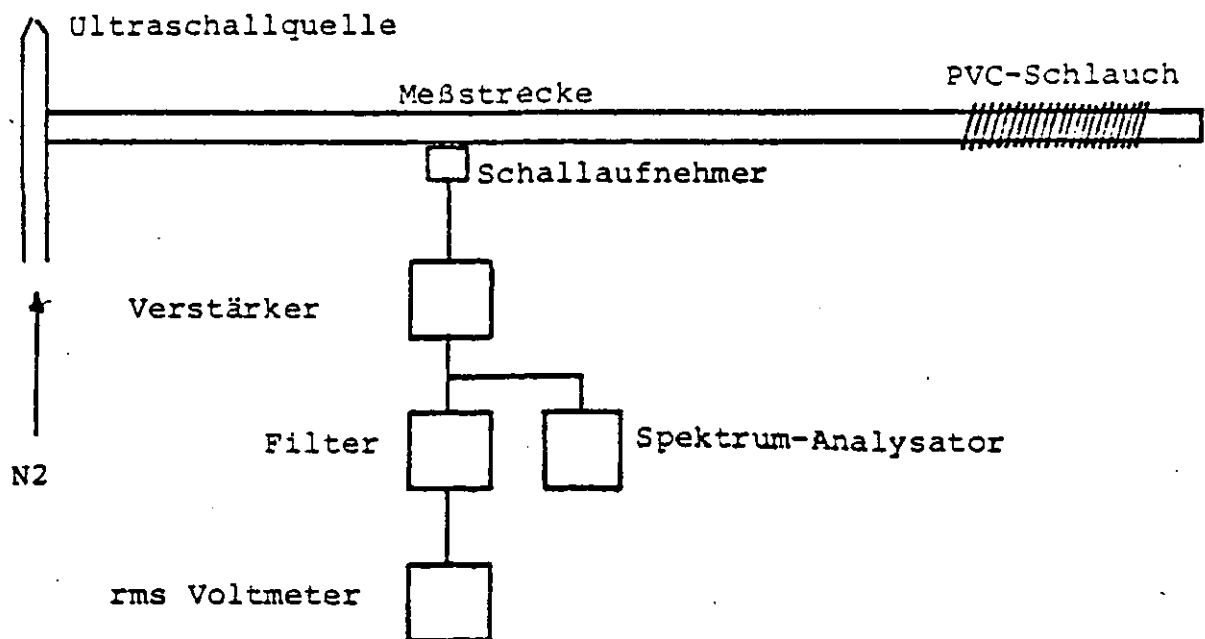


Abb. 1: Versuchsaufbau

2.1.1 Meßstrecke

Die Meßstrecke bestand aus einem Rohr mit folgenden Spezifikationen:

Material: Incoloy 800,

Zusammensetzung, aufgeführt werden nur die Hauptbestandteile, und zwar Näherungswerte, keine Analysenwerte:

30 % Nickel,

19 % Chrom,

47 % Eisen,

Vorbehandlung: kaltgezogen, gebeizt und geglüht,

Hersteller: H. Wiggin & Co. Ltd. Hereford/England.

Abmessungen: äußerer Durchmesser: 26,7 mm

innerer Durchmesser: 22,5 mm

Länge der Meßstrecke: 4,0 m

An einem Ende des Rohres befand sich die Ultraschallquelle, am anderen Ende schloß sich an die Meßstrecke die Dämpfungsstrecke in einer Länge von 1,25 m an. Die 4,0 m lange Meßstrecke war frei von Stützen und Schweißstellen.

2.1.2 Ultraschallquelle

Das Ultraschallsignal wurde dadurch erzeugt, daß Stickstoff unter einem Druck von 11 bar einen sehr engen, bruchrauen Schlitz durchströmte.

Der bruchraue Schlitz, der ein möglichst breitbandiges Schallspektrum mit möglichst "glattem" Frequenzverlauf erzeugen sollte, wurde auf folgende Weise hergestellt. Eine Stahlplatte wurde zunächst eingefräst, um eine "Sollbruchstelle" festzulegen. Dann wurde die Platte in flüssiger Luft abgekühlt, um die Sprödigkeit des Plattenmaterials zu erhöhen. Anschließend ließ sich die Platte durch einen Schlag mit einem Hammer brechen. Die beiden Bruchstücke wurden in einem vorgegebenen Abstand an den Schlitzenden miteinander verschweißt und in dieser Form in ein kurzes Rohrstück, das zuvor entsprechend ausgefräst worden war, eingeschweißt. Dieses kurze Rohrstück wurde dann senkrecht mit der eigentlichen Meßstrecke verschweißt. Auf diese Weise bildete

die Rohrwandung des kurzen Rohrstücks, das die Schallquelle trug, einen luftdichten Abschluß zum Meßrohr und verhinderte damit die Ausbreitung von Luftschall innerhalb der Meßstrecke, der eventuell zu einer Verfälschung der Meßergebnisse hätte führen können.

Der Verlauf des Schallspektrums wird sehr stark von der Schlitzweite beeinflußt, wie das die Abb. 2 und 3 zeigen. (Die Darstellungsweise der Spektrogramme wird im Anhang erklärt.)

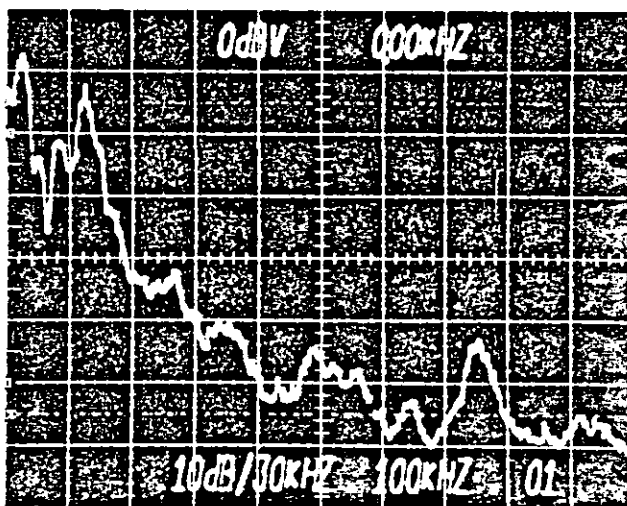


Abb. 2:

Schallspektrum eines bruchrauen Schlitzes

Länge des Schlitzes: 12 mm

Breite des Schlitzes: ca. 0,5 mm

Detektor: D 9201/AD44

Das in Abb. 2 dargestellte Spektrum wurde durch einen Schlitz von 12 mm Länge und einer Breite von ca. 0,5 mm erzeugt. Es wurde mit dem Ultraschalldetektor D 9201/AD 44 gemessen. (Sämtliche hier verwendeten Schallaufnehmer sind vom Hersteller DUNEGAN/ENDEVCO).

Es zeigt sich, daß die Signalthöhe im wesentlichen durch Frequenzen unterhalb von 150 kHz geprägt wird. So erreichen die Frequenzanteile um 30 kHz Amplituden bis zu -8 dBV. Frequenzen oberhalb von 500 kHz liegen bis zu 3 Größenordnungen unter diesem Pegel.

Dieser starke Abfall der Signalhöhe im Bereich höherer Frequenzen ist für die beabsichtigten Messungen ungünstig. Theoretisch ist zwar eine Anhebung des gesamten Signalpegels möglich, indem man den Druck, unter welchem das Fluid ausströmt, erhöht. In der Praxis wird dieser Weg aber dadurch eingeschränkt, daß die sehr hohen Signalamplituden unterhalb von 150 kHz zu einer Übersteuerung des Verstärkers führen.

Eine Anhebung des hochfrequenten Teils, verbunden mit einer Glättung des Spektrums, läßt sich aber durch eine Veränderung der Schlitzweite erzielen. Die Abb. 3 gibt das Spektrum eines sehr engen Schlitzes wieder, dessen Schlitzweite so schmal war, daß sie geometrisch nicht mehr bestimmt werden konnte.

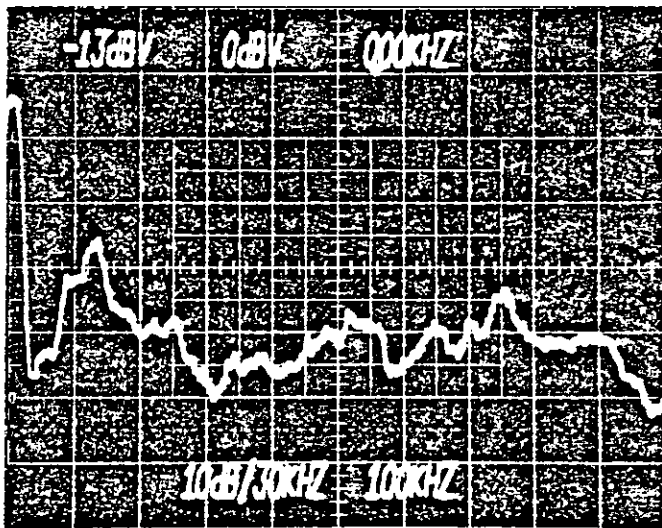


Abb. 3:
Schallspektrum eines sehr engen bruchrauen Schlitzes
Länge des Schlitzes: 42 mm
Schlitzkanten fest gegeneinander gepreßt
Detektor D 9201/AD44

Das in Abb. 3 wiedergegebene Spektrum zeigt den angestrebten glatteren Verlauf. Die Signalamplituden unterhalb von 150 kHz sind im Vergleich zu dem in Abb. 2 dargestellten Spektrum um mehr als 25 dB schwächer, während der Bereich oberhalb von 500 kHz einen Anstieg der Amplituden zu verzeichnen hat, der zum Teil bis zu 20 dB reicht. Dadurch wird ein Signalverlauf er-

zielt, der im Bereich von 0 - 1 MHz einen Unterschied zwischen dem maximalen und minimalen Signalpegel von 27 dB aufweist im Vergleich zu 62 dB im Spektrum des durch den 0,5 mm breiten Schlitz erzeugten Signals.

2.1.3 Dämpfungsstrecke

Um eine Überlagerung der von der Schallquelle ausgehenden Schallwellen durch am Ende des Rohres reflektierte Wellen und eine dadurch bedingte Verfälschung der Meßergebnisse zu vermeiden, wurde das Rohr im Anschluß an die eigentliche Meßstrecke durch Umwickeln mit PVC-Schlauch gedämpft. Die Länge der Dämpfungsstrecke betrug 1,25 m.

In den Abb. 4 und 5 wird der Einfluß der Dämpfungsstrecke auf das Spektrum wiedergegeben. Die Abb. 4 gibt in der obersten Kurve das Spektrum kurz vor der Dämpfungsstrecke, in der mittleren Kurve das Spektrum unmittelbar hinter der Dämpfungsstrecke und in der untersten Kurve den Rauschpegel wieder.

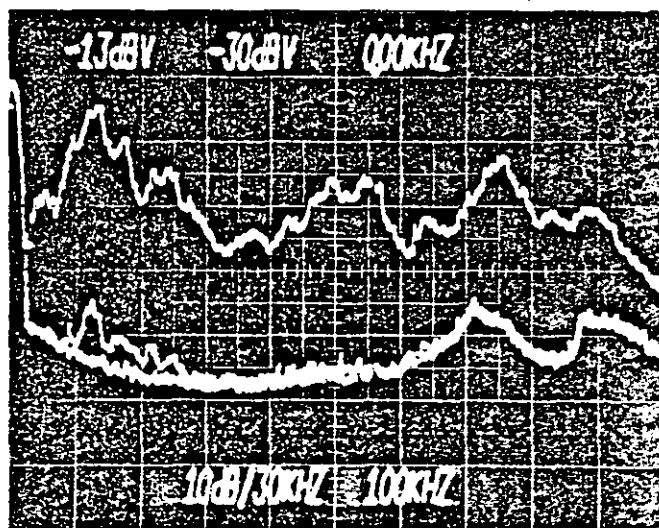


Abb. 4: Dämpfung der Schallwellen im Bereich von 0-1 MHz durch Umwickeln des Rohres mit PVC-Schlauch.

obere Kurve: Schallsignal unmittelbar vor der Dämpfungsstrecke, mittlere Kurve (nur im Bereich von 80 kHz bis 260 kHz erkennbar): Schallsignal unmittelbar hinter der Dämpfungsstrecke, untere Kurve: Rauschpegel, Detektor: D 9201/AD44

Die Abb. 4 zeigt deutlich, daß oberhalb von 260 kHz ein Schallsignal hinter der Dämpfungsstrecke nicht mehr nachweisbar ist.

Um den Bereich bis zu 200 kHz quantitativ besser erfassen zu können, wird dieser Bereich des Spektrums noch einmal in Abb. 5 dargestellt.

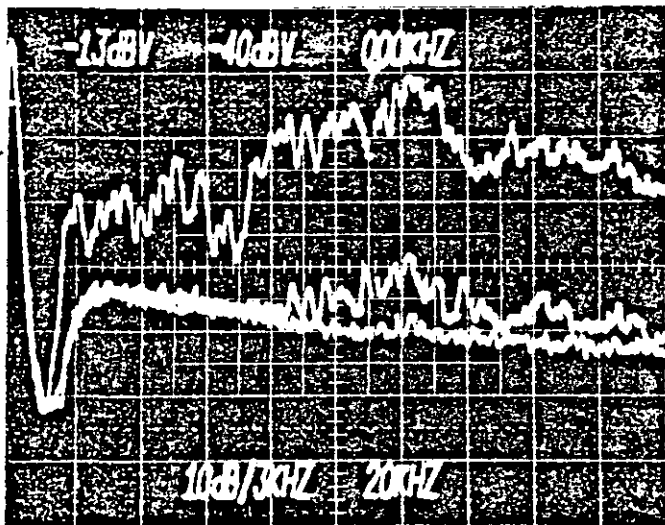


Abb. 5:

Dämpfung der Schallwellen im Bereich von 0-200 kHz

durch Umwickeln des Rohres mit PVC-Schlauch

obere Kurve: Schallsignal unmittelbar vor der
Dämpfungsstrecke,

mittlere Kurve: Schallsignal unmittelbar hinter
der Dämpfungsstrecke,

untere Kurve: Rauschpegel,

Detektor: Ad 9201/AD 44

Führt man für das Schallsignal unmittelbar hinter der Dämpfungsstrecke eine Korrektur in der Form durch, daß man den Rauschpegel vom Signalwert subtrahiert, so erhält man als Ergebnis, daß für diesen Frequenzbereich die Dämpfung mindestens 30 dB beträgt.

Die Tatsache, daß oberhalb dieses Frequenzbereiches das Signal nicht mehr vom Rauschuntergrund zu trennen ist, läßt den Schluß zu, daß oberhalb von 200 kHz die Dämpfung mindestens dieselbe Höhe hat.

Da die Schallwellen nach ihrer Reflexion am Rohrende die Dämpfungsstrecke ein zweites Mal durchlaufen müssen, werden sie noch einmal um 30 dB, d.h. insgesamt um 60 dB geschwächt. Damit kann man sicher sein, daß der reflektierte Anteil im Schallsignal 0,1 % nicht übersteigt. Dieser Anteil liegt unterhalb der Fehlergrenze der Schallmessungen und kann damit vernachlässigt werden.

2.1.4 Schalldetektor

Entscheidend für den einer Messung zugänglichen Frequenzbereich ist neben dem vom Leck emittierten Schallspektrum insbesondere auch die Übertragungsfunktion des benutzten Schalldetektors. Aus diesem Grund wurden Vergleichsmessungen mit den zur Verfügung stehenden Schallaufnehmern zwecks Auswahl des optimalen Detektors durchgeführt.

Zunächst zeigt Abb. 6 noch einmal das Spektrum des sehr schmalen bruchrauen Schlitzes, aufgenommen mit dem Detektor D 9201/AD 44 wobei der abgebildete Spektralbereich bis zu 2 MHz ausgedehnt wurde.

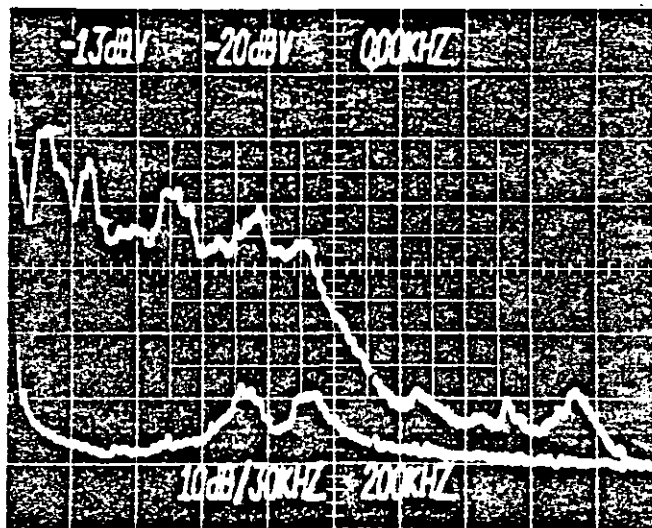


Abb. 6: Schallspektrum im Bereich von 0-2 MHz
obere Kurve: Schallspektrum
untere Kurve: Rauschpegel
Detektor: D 9201/AD 44

Die Abb. 7 zeigt das mit dem Detektor D 9202/AF 86 aufgenommene Schallspektrum, das ebenfalls durch den sehr schmalen Schlitz erzeugt wurde, wie auch sämtliche folgenden Spektren.

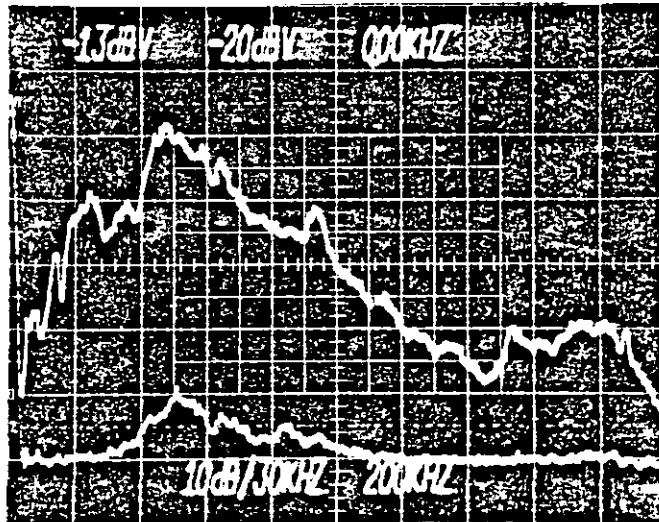


Abb. 7:
Schallspektrum im Bereich von 0-2 MHz
obere Kurve: Schallspektrum
untere Kurve: Rauschpegel
Detektor: D 9202/AF 86

Bei einem Vergleich der Abb. 6 und 7 wird der außerordentlich starke Einfluß der Übertragungsfunktion des jeweils benutzten Schallaufnehmers auf die Form des Spektrums sichtbar. Gleichzeitig läßt die Abb. 7 erkennen, daß der Detektor 9202/AF 86 für Messungen im Bereich oberhalb von 1 MHz wesentlich besser geeignet ist, da der Signal-Rauschabstand ca. 10 dB größer ist als beim Detektor D 9201/AD 44. Besonders deutlich wird die höhere Empfindlichkeit des Detektors D 9202/AF 86 bei 2 MHz. Er weist hier noch einen klaren Abstand zum Rauschpegel auf, während das beim Detektor D 9201/AD 44 nicht mehr der Fall ist. Andererseits ist zu sehen, daß im Bereich unter 400 kHz der Detektor D 9201/AD 44 eine höhere Empfindlichkeit aufweist, so daß für diesen Frequenzbereich der letztgenannte Detektor geeigneter ist.

Diese beiden Detektoren zeigten für die beabsichtigten Messungen

den besten Frequenzgang. Alle übrigen verfügbaren Detektoren (D 9203, D 140 und D 750) erwiesen sich als weniger gut geeignet.

2.1.5 Elektronischer Teil

Die vom Ultraschalldetektor kommenden elektrischen Signale wurden in einem Verstärker, Modell 1801, Fabrikat DUNEGAN-ENDEVCO, mit einem integrierten Hochpaßfilter, Filterkante bei 20 kHz, verstärkt.

An den Verstärker schloß sich ein Bandfilter, Modell 3202, Fabrikat KROHN-HITE, an, das zusammen mit dem nachgeschalteten Effektivvoltmeter Modell 3400 A, Fabrikat HEWLETT-PACKARD, die selektive Messung der effektiven Spannung in beliebig zu begrenzenden Frequenzbereichen erlaubte. Diese Frequenzbereiche waren 20/30 kHz, 50/60 kHz, 90/110 kHz, 200/300 kHz, 400/600 kHz und 0,9/1,1 MHz. Der erste Frequenzwert gibt die Einstellung des Hochpaßfilters, der zweite Wert die Einstellung des Tiefpaßfilters an.

Außerdem wurde zur Auswertung ein Spektralanalysator, Modell 7L5, Fabrikat TEKTRONIX, eingesetzt. Die spektralanalytische Darstellung des Signals erlaubt eine direkte frequenzabhängige Auswertung auch ohne den Einsatz eines Bandfilters. Ein weiterer Vorzug des Spektrumanalysators liegt darin, daß er niedrigere Signalpegel als die Meßkette, bestehend aus Bandfilter und Effektivvoltmeter, zu messen gestattet. Der minimal meßbare Signalpegel liegt bei dem Effektivvoltmeter bei -75 dBV, während beim Spektralanalysator Pegel bis unter -120 dBV meßbar sind. Hier wird jedoch die Begrenzung des noch auswertbaren Signals durch den Rauschpegel des Verstärkers gegeben, der im hochfrequenten Gebiet oberhalb von 1,5 MHz bei ca. -90 dBV liegt und mit steigender Frequenz geringfügig abnimmt, bei 3,5 MHz liegt der Rauschpegel bei -95 dBV. Als Nachteil des Spektralanalysators muß angemerkt werden, daß die Ablesegenauigkeit bei der Oszillogrammauswertung geringer ist als beim Ablesen des Analoganzeigegerätes im Effektivvoltmeter. Es wird sich jedoch zeigen, daß unterschiedliche Ankoppelbedingungen

des Schallaufnehmers an die Meßstrecke zu größeren Fehlern führten als Ablesefehler in den Oszillogrammen.

2.2 Versuchsdurchführung

Die Erzeugung der Schallsignale erfolgte, wie bereits im Abschnitt Versuchsaufbau angegeben, indem Stickstoff unter einem Druck von 11 bar den bruchrauen Schlitz durchströmte. Der Stickstoff wurde einer Flaschenbatterie entnommen, denn nur dadurch konnte gewährleistet werden, daß die Versuche bei einem konstanten Druck und folglich mit einer Schallquelle konstanter Intensität gefahren werden konnten.

Die Schallintensität wurde längs des Rohres, ausgehend von einem willkürlichen Nullpunkt, gemessen. Der Nullpunkt lag in unmittelbarer Nachbarschaft der Schweißverbindung des Meßrohres mit dem kurzen Rohrstück, das die Schallquelle trug.

Die eigentliche Schwierigkeit der gesamten Messungen lag in der Ankopplung des Schallaufnehmers an die Meßstrecke. Es ist aus der Ultraschallmeßtechnik hinlänglich bekannt, daß es sehr schwierig ist, Ankoppelbedingungen so zu reproduzieren, daß exakt identische Bedingungen gegeben sind. Dies ist selbst dann der Fall, wenn sowohl die schallführende Fläche als auch die sensitive Fläche des Schallaufnehmers ebene Flächen sind. Erst recht trifft das aber für den hier vorliegenden Fall zu, in welchem die schallführende Fläche die Oberfläche eines Zylinders und die sensitive Fläche des Schallaufnehmers eine ebene Fläche ist, so daß nur Linienkontakt hergestellt werden kann. Im Rahmen eines früheren Experimentes wurden Versuche durchgeführt, dieses Problem dadurch zu umgehen, daß ein Schalleiter zwischen das Rohr und den Detektor gebracht wurde, der auf der einen Seite in Form einer Hohlkehle ausgebildet war, die an die Krümmung der Rohroberfläche angepaßt war, und auf der anderen Seite einen ebenen Abschluß zur Ankopplung des Detektors hatte. Dieser Schalleiter hat natürlich den Nachteil, daß eine zweite Koppelfläche in Kauf genommen werden muß. Außerdem muß offensichtlich eine präzise Anpassung der Hohlkehle an die Rohroberfläche ge-

geben sein, wenn bessere Ergebnisse erzielt werden sollen, als bei einer direkten Ankopplung des Detektors an das Rohr. Diese Bedingung konnte nicht erfüllt werden, die Ergebnisse waren schlechter als bei einer direkten Ankopplung des Detektors.

Die Schallaufnehmer wurden unter Verwendung eines Koppelmediums hoher Zähigkeit an das Rohr gebracht. Dabei zeigte sich, daß die Menge des Koppelmediums sowohl die absolute Höhe des Signals wie auch die Form des Spektrums beeinflusste.

Im ersten Fall wurde der Detektor zunächst mit einer Schicht von ca. 1,5 mm bedeckt und dann auf das Rohr gepreßt. Dadurch bildete sich seitlich von der Berührungslinie des Detektors mit dem Rohr durch Verdrängung des Koppelmediums aus dem zentralen Bereich der Detektorfläche eine bis zu ca. 2,5 mm dicke Schicht, die schätzungsweise bis zu 3 mm seitlich von der Berührungslinie zwischen Detektor und Rohroberfläche haftete.

Im zweiten Fall wurde die sensitive Fläche des Schallaufnehmers nur extrem dünn mit Koppelmedium versehen.

In der Tabelle 1 sind für willkürlich gewählte Frequenzen die Signalwerte bei Verwendung einer dicken und dünnen Koppelmediumschicht angegeben.

Bildet man die Differenz der Signalpegel bei unterschiedlicher Ankopplung, so zeigt sich, daß im allgemeinen Abweichungen um ca. 2 dB auftreten, und zwar liefert die Ankopplung bei nur sehr dünner Verwendung von Koppelmedium das größere Signal. Ein Einfluß der Frequenz, d.h. ein eindeutiger Trend bei steigender oder fallender Frequenz kann aus den Ergebnissen nicht abgelesen werden.

Neben diesem allgemeinen Effekt, daß das Signal bei dünner Koppelmediumschicht stärker ist, treten aber auch Umkehrungen dieser Erscheinungen auf, und das oft bei eng benachbarten Frequenzen.

Frequenz	Schallsignal bei einer Koppelmediumschicht		Signal- differenz
	bis 2,5 mm dick	sehr dünn	
MHz	-dBV	-dBV	dBV
0,075	71,0	67,5	3,5
0,100	75,0	73,0	2,0
0,130	64,5	62,0	2,5
0,150	67,0	66,0	1,0
0,180	58,0	56,5	1,5
0,200	60,0	62,5	-2,5
0,225	55,0	57,0	-2,0
0,250	62,5	60,0	2,5
0,300	61,0	58,5	2,5
0,350	55,0	57,0	2,0
0,400	53,0	51,0	2,0
0,450	45,0	46,5	-1,5
0,475	41,0	41,0	0
0,500	45,0	41,0	4,0
0,550	47,0	46,5	0,5
0,580	43,5	44,5	-1,5
0,650	51,0	47,0	4,0
0,750	57,5	55,0	2,5
0,800	58,0	59,0	-1,0
0,900	60,5	61,0	-0,5
1,250	78,4	76,6	1,8
1,360	77,8	77,8	0
1,500	82,9	82,9	0
1,750	76,6	73,7	2,9
2,100	86,3	84,9	1,4
2,250	96,4	94,0	2,4
2,640	89,9	90,8	-0,9
2,740	88,8	86,6	2,4
2,800	98,7	96,2	2,5

Tabelle 1: Signalthöhe bei unterschiedlichen Schichtdicken
des Koppelmediums

Man kann also nicht folgern, daß durch eine Veränderung der Koppelschicht ganz allgemein das Signal entweder vergrößert oder verkleinert wird, vielmehr ist festzustellen, daß auch die Form des Spektrums verändert werden kann, wobei hier offen bleiben muß, ob sich darin allein ein Effekt der Menge des Koppelmediums oder aber die allgemein bekannte Tatsache zeigt, daß die Ankoppelbedingungen nur sehr schwer wirklich exakt zu reproduzieren sind.

Da mit abnehmender Schichtdicke des Koppelmediums die Signalarstärke anstieg, wurde versucht, völlig auf Koppelmedium zu verzichten. Das führte aber wieder zu einer Abnahme der Signalthöhe und außerdem noch geringerer Reproduzierbarkeit der Meßwerte.

In diesem Zusammenhang ist hier eine weitere Erfahrung bei der Durchführung der Messungen anzuführen, um die Problematik der Ankopplung zu verdeutlichen. Bei dem Detektor D 9201/AD 44 zeigte sich im Frequenzbereich um 50 kHz, d.h. wenn durch Bandfilterung die übrigen Frequenzteile eliminiert wurden, daß das maximale Detektorsignal dann erzielt werden konnte, wenn der Detektor nicht auf der Linie eines Durchmessers seiner sensitiven Fläche, sondern auf der Linie einer Sekante fest gegen das Rohr gepreßt wurde. Dieser Effekt zeigte sich nur in dem erwähnten Frequenzbereich, in allen anderen Bereichen wurde das maximale Signal bei "normaler" Ankopplung längs eines Durchmessers erzielt.

2.3 Meßergebnisse

In der Tabelle 2 sind die Meßwerte angegeben, die durch Bandfilterung und anschließende Messung des Effektivwertes der Signalspannung gewonnen wurden. Als Bezugsfrequenz wurde jeweils derjenige Wert in dem ausgefilterten Bereich genommen, bei dem das Signal den maximalen Wert erreichte.

Die Tabelle 3 enthält die Meßergebnisse nach Auswertung der Spektrogramme. Die willkürlich erscheinenden Bezugsfrequenzen wurden so ausgewählt, daß an der Bezugsfrequenz ein besonders hohes Signal gegeben war, was insbesondere im hochfrequenten

Gebiet bei ohnehin nur geringem Signal/Rauschverhältnis von Bedeutung war.

Frequenz	Dämpfung pro Länge	Dämpfung pro Länge und Frequenz	Korrelation
kHz	dB/m	dB/m · Hz	
22	0,20	$9,1 \cdot 10^{-6}$	(0,71)
55	0,65	$11,8 \cdot 10^{-6}$	(0,67)
100	(-0,21)	$(-2,1 \cdot 10^{-6})$	(-0,46)
240	0,76	$3,2 \cdot 10^{-6}$	(0,97)
550	1,23	$2,2 \cdot 10^{-6}$	(0,94)
920	2,74	$3,0 \cdot 10^{-6}$	(0,99)

Tabelle 2: Dämpfung des Körperschalls
Meßmethode: V_{eff} nach Bandfilterung

Frequenz	Dämpfung pro Länge	Dämpfung pro Länge und Frequenz	Korrelation
kHz	dB/m	dB/m · Hz	
75	0,3	$4,0 \cdot 10^{-6}$	(0,45)
250	0,5	$2,0 \cdot 10^{-6}$	(0,57)
425	1,0	$2,4 \cdot 10^{-6}$	(0,96)
750	1,5	$2,0 \cdot 10^{-6}$	(0,88)
1050	2,7	$2,6 \cdot 10^{-6}$	(0,98)
1250	3,9	$3,1 \cdot 10^{-6}$	(0,96)
1550	4,2	$2,7 \cdot 10^{-6}$	(0,96)
1830	4,7	$2,6 \cdot 10^{-6}$	(0,95)
2100	6,7	$3,2 \cdot 10^{-6}$	(0,90)
2750	8,1	$2,9 \cdot 10^{-6}$	(0,94)
3040	12,4	$4,1 \cdot 10^{-6}$	(0,80)

Tabelle 3: Dämpfung des Körperschalls
Auswertung von Spektrogrammen

Die für die Dämpfung angegebenen Werte wurden nach der Kleinstquadratmethode berechnet. Der in diesem Verfahren definierte Korrelationskoeffizient ist ebenfalls angegeben, jedoch eingeklammert, und zwar aus dem Grund, weil man nicht davon ausgehen kann, daß die Meßwerte einer statistischen Verteilung folgen. Deutliches Beispiel liefert dafür der für eine Schallfrequenz von 100 kHz in Tabelle 2 angegebene Wert, der negativ ist, was physikalisch widersinnig ist. Er ist aus diesem Grund ebenfalls in Klammern gesetzt. Dieses negative Ergebnis läßt sich nur so erklären, daß die Ankoppelbedingungen bei der Messung am Rohranfang im Mittel schlechter waren als am Rohrende. Die unterschiedliche Qualität der Ankoppelbedingungen führt damit zu einem systematischen Fehler.

Ein weiterer Grund dafür, daß die angegebenen Korrelationskoeffizienten nicht exakt berechnet werden konnten, liegt darin, daß jeweils nur die Maximalwerte des gemessenen Schallsignals registriert wurden, die durch Verschieben des Detektors längs des Rohrumfangs und Drehen um seine Achse gemessen werden konnten. Das hat zur Folge, daß mehrere "Versuche" jeweils nur zu einem Meßwert führten, d.h. die Anzahl der Meßwerte differiert von der Zahl der Versuche. Folglich ist eine definitionsgemäße Berechnung der im Korrelationskoeffizienten enthaltenen Standardabweichungen nicht möglich.

Wenn der Korrelationskoeffizient trotz theoretisch nicht exakter Berechnungsgrundlage angegeben wird, so deswegen, weil er als ein Maß für die Güte der Meßwerte angesehen werden kann. Das zeigt sich insbesondere auch darin, daß er einen Trend zeigt, der aus den Messungen bzw. Meßwerten selbst erklärt werden kann. Im niederfrequenten Gebiet, in welchem der Korrelationskoeffizient schlechte Werte hat, ist die Dämpfung sehr niedrig. Das hat zur Folge, daß bei der Länge der zur Verfügung stehenden Meßstrecke die insgesamt gemessene Dämpfung von gleicher Größe oder eventuell sogar geringer war als die Schwankungen der Meßwerte infolge unterschiedlicher Ankoppelbedingungen. Daraus wird verständlich, daß der Fehler entsprechend hoch bzw. umgekehrt, der Korrelationskoeffizient entsprechend niedrig sein muß. Im Bereich mittlerer Frequenzen, siehe Tabelle 3, wurden infolge

höherer Dämpfung die Meßergebnisse genauer, was sich in einem Anstieg des Korrelationskoeffizienten zeigt.

Bei sehr hohen Frequenzen treten als Folge der starken Dämpfung zwei Effekte auf, die wieder zu einer Vergrößerung des Meßfehlers und damit zu einer Abnahme des Korrelationskoeffizienten führen, und zwar einerseits die sehr niedrige Signalhöhe und andererseits die extrem kurze Meßstrecke, auf der noch eine Auswertung möglich war. Die erforderliche Korrektur des niedrigen Signalwertes durch Subtraktion des Rauschpegels führt zu einer zum Teil erheblichen Vergrößerung des Fehlers. Dies soll ein Beispiel verdeutlichen.

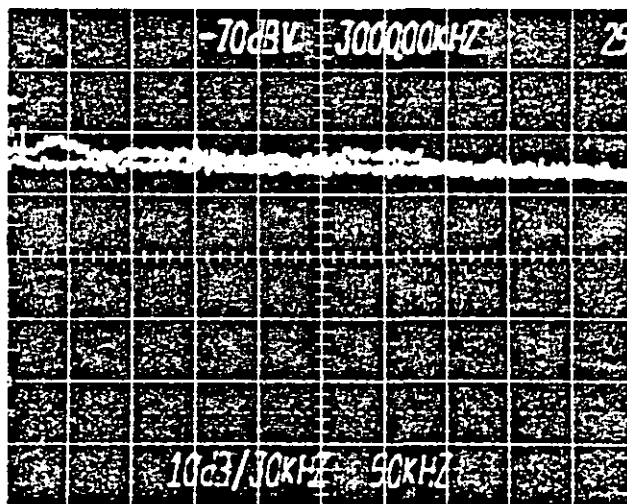


Abb. 8:

Schallspektrum im Abstand von 0,25 m vom Nullpunkt der Meßstrecke im Frequenzbereich von 3,0 - 3,5 MHz

obere Kurve: Signal

untere Kurve: Rauschpegel

Detektor: D 9202/AF 86

Nimmt man z.B. den Signalwert bei 3,3 MHz in Abb. 8, die das Schallspektrum im Frequenzbereich von 3,0 - 3,5 MHz in einem Abstand von 0,25 m vom Nullpunkt der Meßstrecke zeigt, so liest man einen Wert von ca. -94 dB ab, für den Rauschpegel einen Wert von ca. -96 dB. Nimmt man für den Ablesefehler einen Wert von $\pm 0,5$ dB an, so führt die Rauschkorrektur zu folgenden

Werten:

$$-(94,0 \pm 0,5) \text{ dB} - (-96,0) \text{ dB} \approx -108 \pm 2,5 \text{ dB},$$

d.h. der "Ablesefehler" von 0,5 dB wird durch die erforderliche Subtraktion des Rauschpegels zu einem "Meßfehler" von 2,5 dB.

Diese Vergrößerung des "Meßfehlers" um den Faktor 5 in einem Abstand von nur 0,25 m weist bereits darauf hin, daß Messungen in größerem Abstand in diesem Frequenzbereich nicht mehr sinnvoll bzw. infolge der starken Dämpfung nicht mehr möglich sind. In der Abb. 9 sind die Dämpfungswerte in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.

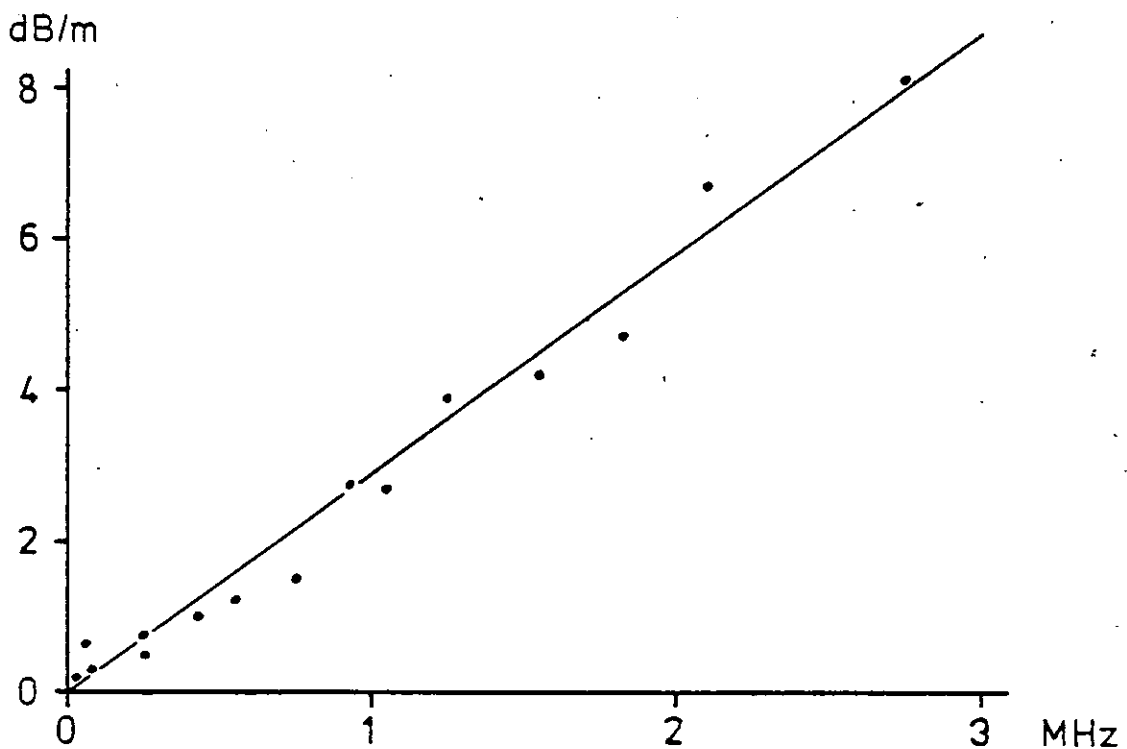


Abb. 9:
Körperschalldämpfung im
Frequenzbereich von 0 - 3 MHz

In dem hier betrachteten Frequenzbereich gilt für die Körperschalldämpfung eine lineare Abhängigkeit von der Frequenz. Berechnet man nach der Kleinstquadratmethode die Anpassungsgerade für die Werte in Abb. 9, so erhält man die in Abb. 9 eingezeich-

nête Gerade. Das Steigungsmaß dieser Geraden ergibt die frequenzbezogene Dämpfung an, für die man den Wert $2,9 \cdot 10^{-6}$ dB/m · Hz erhält.

Die frequenzabhängige Dämpfung für die einzelnen Frequenzen ist in den Tabellen 2 und 3 angegeben. Bildet man aus diesen Werten den Mittelwert, so erhält man den Wert $(2,79 \pm 0,34) \cdot 10^{-6}$ dB/m · Hz, falls man sich auf Werte mit einem Korrelationskoeffizienten von $\geq 0,90$ beschränkt, und den Wert $(2,83 \pm 0,31) \cdot 10^{-6}$ dB/m · Hz bei Berücksichtigung der Werte mit einem Korrelationskoeffizienten $\geq 0,96$. Die auf diese Weise ermittelten Werte weisen einen Fehler von mehr als 10 % auf. Aus diesem Grund soll zusammenfassend der aufgerundete Wert von $3 \cdot 10^{-6}$ dB/m · Hz Berechnungen über die Dämpfung von Körperschallwellen bei Raumtemperatur in einem Dampferzeugerrohr der hier untersuchten Spezifikation zugrunde gelegt werden.

3. BESTIMMUNG DER TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER KÖRPERSCHALLDÄMPFUNG

3.1 Versuchsaufbau

In Abb. 10 ist schematisch der Versuchsaufbau dargestellt, der sich von dem in Abb. 1 wiedergegebenen Aufbau hauptsächlich nur durch die beheizbare Meßstrecke und die fest installierten Schallaufnehmer unterscheidet.

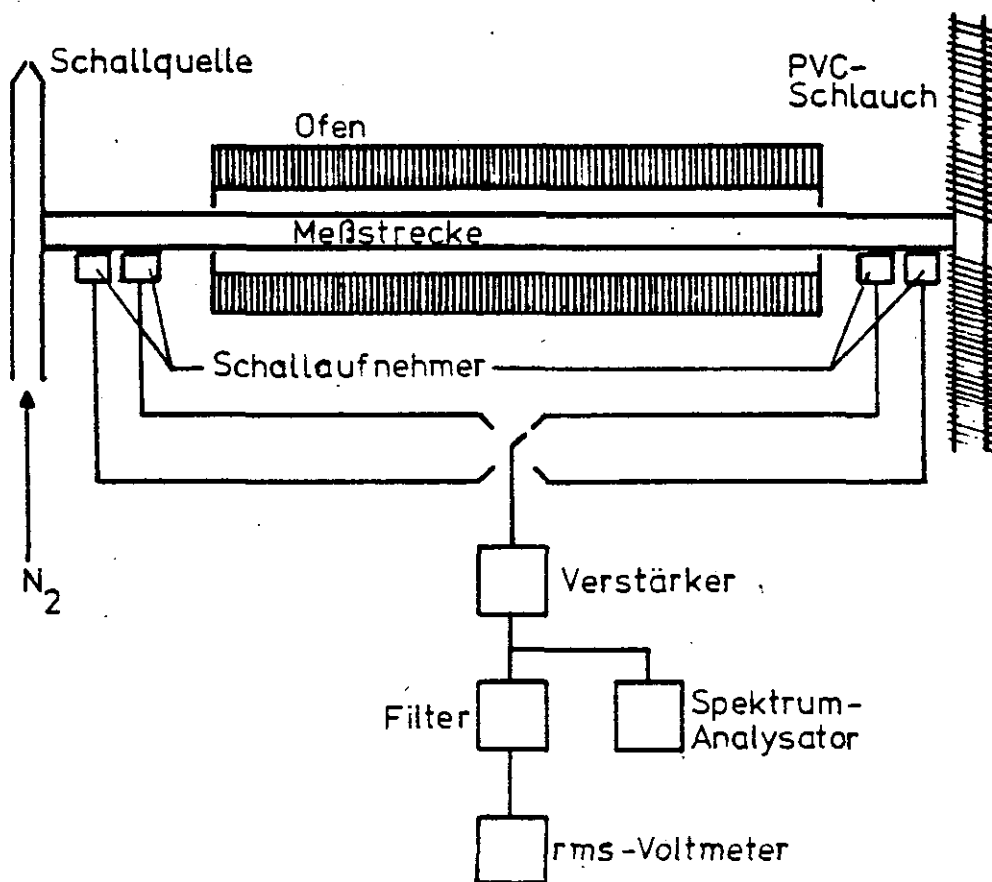


Abb. 10 : Versuchsaufbau

3.1.1 Meßstrecke

Hinsichtlich der Spezifikationen der Meßstrecke wird auf Abschnitt 2.1.1 verwiesen. Abweichend von den dort angegebenen Werten wurde hier die Länge der Meßstrecke jedoch auf 8,50 m vergrößert, um dadurch die Meßeffekte entsprechend zu steigern.

Auf einer Länge von 7 m war das Incoloy-Rohr von einem Ofen umgeben, der es ermöglichte, das Rohr bis zu einer Temperatur von über 800°C aufzuheizen. Der Ofen war in 7 einzeln regelbare Abschnitte unterteilt. Infolge des zwangsläufig an den Ofenenden gegebenen Temperaturgradienten befand sich das Rohr in einer Länge von ca. 6,50 m auf Nenntemperatur.

Die Gesamtlänge des Rohres war länger als die heizbare Strecke, damit außerhalb des Ofens an beiden Enden 0,75 m lange Rohrstücke zur weiteren Temperaturabsenkung vorhanden waren. Diese Temperaturabsenkung war erforderlich, um die Rohrtemperatur in den Detektorpositionen auf Werte unter 50°C einzuschränken.

Die Schallaufnehmer sind zwar für höhere Temperaturen ausgelegt, die maximale Arbeitstemperatur wird mit 120°C angegeben, ihre Empfindlichkeit bleibt aber innerhalb des angegebenen Temperaturbereiches nicht konstant, sondern fällt bei einem Anstieg der Temperatur von 20 auf 120°C um ca. 7 dB /2/. Steigt die Detektor-temperatur von 20 auf 50°C , so ändert sich die Empfindlichkeit um weniger als -1 dB /2/.

Die Länge der Meßstrecke von 8,50 m stand nicht in einem Stück zur Verfügung, so daß das Rohr auf dieser Länge zweimal geschweißt werden mußte.

Zur Abstützung des Rohres innerhalb des Ofens dienten Keramikeinsätze, auf denen das Rohr ohne weitere Befestigung lose auflag. Zur Vermeidung von Korrosion wurde die heizbare Strecke mit Argon gespült.

An dem einen Ende der Meßstrecke befand sich die Schallquelle, am anderen Ende schloß sich die Dämpfungsstrecke an.

3.1.2 Schallquelle

Die Schallquelle war vom gleichen Aufbau, wie unter 2.1.2 beschrieben. Es wurden aber abweichend zu den in Abschnitt 2 beschriebenen Messungen hier für die Messungen am Rohranfang und Rohrende unterschiedliche Schallsignale erzeugt, indem man Stickstoff unter einem Druck von 21 bar für die Messungen am Rohranfang und von 41 bar für die Messungen am Rohrende durch den

Schlitz strömen ließ, siehe Abschnitt 3.2.

3.1.3 Dämpfungsstrecke

Die sich an die Meßstrecke anschließende Dämpfungsstrecke konnte aus räumlichen Gründen nicht nahtlos mit der eigentlichen Meßstrecke verbunden werden, sie mußte unter einem Winkel von 90° mit der Meßstrecke verschweißt werden. Dadurch können Reflexionen nicht ausgeschlossen werden, wie diese evtl. auch an den Schweißnähten innerhalb der Meßstrecke auftreten können. Aus diesem Grund wurden die Schallsignale nicht nur am Ende, sondern auch am Anfang des Rohres gemessen, wie im Abschnitt 3.2 diskutiert wird.

3.1.4 Schalldetektoren

Als Schallaufnehmer wurden für den Frequenzbereich bis zu 250 kHz Detektoren der Baureihe D 9201 und für den Frequenzbereich oberhalb von 250 kHz Schallaufnehmer der Baureihe D 9202 verwendet. Am Anfang der Meßstrecke, d.h. in der Nähe der Schallquelle, wurden die Detektoren D 9201/Ad48 und D 9202/AF88 und am Ende der Meßstrecke D 9201/AD44 und D 9202/AF86 fest mit dem Rohr verbunden. Dazu wurden die Schallaufnehmer zunächst mit einem Koppelmedium hoher Zähigkeit benetzt, fest gegen das Rohr gedrückt und anschließend mit einem bei höherer Temperatur flüssigen Koppelmedium auf Paraffin-Basis übergossen, das nach Erhaltung eine während des Experimentes gleichbleibende Ankopplung der Detektoren an die Meßstrecke bewirkte.

3.1.5 Elektronischer Teil

Der elektronische Teil des Versuchsaufbaus ist mit dem im Abschnitt 2.1.5 beschriebenen identisch.

3.2 Versuchsdurchführung

Die Ofentemperatur wurde ausgehend von der Raumtemperatur schrittweise erhöht. Nach zwei Temperaturschritten von ca.

65⁰C und 70⁰C wurde die Temperatur im Bereich von 156⁰ bis 651⁰C um jeweils ca. 50⁰C erhöht. Oberhalb von 651⁰C wurde die Schrittweite auf 30 bis 20⁰C und zum Teil weniger verringert. Maximal wurde eine Temperatur von 865⁰C eingestellt.

Die Abweichungen der Temperaturen in den einzelnen Ofenabschnitten vom Mittelwert lagen im allgemeinen unter 4⁰C und erreichten nur in Ausnahmefällen 6⁰C. Diese Abweichungen können vernachlässigt werden, da sie die Meßergebnisse unter 600⁰C nicht meßbar und von 600-800⁰C nur innerhalb der ansteigenden Fehlergrenze beeinflussen. Nach jeder Temperaturerhöhung wurde der Schallpegel am Rohranfang und Rohrende gemessen.

Mit den Messungen am Rohranfang sollten eventuelle Reflexionen der Schallwellen an der Übergangsstelle der Meßstrecke zu der Dämpfungsstrecke und eine zweite Reflexion am vorderen Rohrende festgestellt werden. Treten solche doppelten Reflexionen in meßbarer Höhe auf, so wird ein Anteil im Signal der Schallaufnehmer am hinteren Ende der Meßstrecke durch Schallwellen hervorgerufen, die die Meßstrecke dreimal durchlaufen haben und folglich wesentlich stärker gedämpft worden sind als diejenigen Schallwellen, die nicht reflektiert wurden. Diese Reflexionen würden damit das Meßergebnis direkt beeinflussen und zu falschen Ergebnissen führen.

Durch die Messung am Rohranfang wird neben dem in die Meßstrecke eingespeisten Schallsignal auch der eventuell reflektierte Anteil, der die Meßstrecke zweimal durchlaufen hat und entsprechend gedämpft worden ist, registriert. Da die Dämpfung mit steigender Temperatur wächst, nimmt der reflektierte Anteil im Schallpegel ab, so daß die vorderen Schallaufnehmer ebenfalls ein temperaturabhängiges Signal zeigen müßten. Da außerdem die Dämpfung frequenzabhängig ist und in den verschiedenen Frequenzbereichen unterschiedlich stark ansteigt, wie im Abschnitt 3.3.2 gezeigt wird, müßten sich in den verschiedenen Frequenzbereichen unterschiedlich starke Effekte ergeben. Das wurde jedoch nicht beobachtet, im Bereich von 20 kHz bis 1 MHz blieb innerhalb statistischer Schwankungen der Signalpegel, der mit den Detektoren am Rohranfang gemessen wurde, konstant.

Folglich kann man eine Verfälschung der Ergebnisse durch mehr-

fach reflektierte Schallwellen ausschließen.

Ähnliche Reflexionen, wenn auch mit geringerer Höhe, sind an den Schweißnähten innerhalb der Meßstrecke denkbar. Mit obigem Ergebnis kann ihr Einfluß ebenfalls vernachlässigt werden.

Es führen nur solche Schallwellen zu einer Verfälschung der Meßergebnisse, die die Meßstrecke mehrfach durchlaufen haben. Tritt ein Anteil im Signal der Detektoren am Ende der Meßstrecke auf, der auf reflektierten Schall am Ansatz der Dämpfungsstrecke herührt und der mit den vorderen Schallaufnehmern infolge der doppelten Dämpfung gar nicht mehr registriert wird, so führt dieser Anteil zwar zur einer Erhöhung des Detektorsignals am Ende der Meßstrecke, diese Erhöhung bleibt aber ohne Einfluß auf das eigentliche Meßergebnis, da die relative Höhe des reflektierten Anteils konstant bleibt.

Die Annahme eventueller Reflexionen führt jedoch dazu, daß auf Absolutmessungen verzichtet werden muß.

Ein weiterer Grund liegt darin, daß innerhalb des Ofens die Meßstrecke mehrfach abgestützt wurde. Durch diese Stützen kann möglicherweise Schallenergie abgeleitet werden, wodurch das Signal am Rohrende geschwächt wird, so daß bei einer Absolutmessung fälschlich höhere Werte der Dämpfung gemessen worden wären als sie der reinen Dämpfung innerhalb des Rohres entsprechen.

Eine wesentliche Voraussetzung des hier durchgeführten Experimentes liegt in der Annahme, daß entweder diese Ableitung von Schallenergie konstant bleibt und sich nicht mit steigender Temperatur ändert oder aber relativ niedrig ist, so daß bei einer eventuellen Temperaturabhängigkeit dieser Einfluß vernachlässigt werden kann. Absolutmessungen wären nur unter Verzicht auf Schweißnähte innerhalb und am Ende der Meßstrecke und ohne Stützen möglich gewesen. Dieser Verzicht hätte eine erheblich verkürzte Meßstrecke zur Folge gehabt. Damit wären die Meßeffekte reduziert und der Meßfehler entsprechend gesteigert worden.

Aus diesem Grund wurde der Absolutwert der Dämpfung in einem separaten Versuch bestimmt, wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben und der ermittelte Wert von $3 \cdot 10^{-6} \text{ dB/m} \cdot \text{Hz}$ dann bei der

Auswertung den hier gewonnenen Ergebnissen zugrunde gelegt.

Die Beschränkung auf Relativmessungen erlaubte es, für die Messungen am Rohranfang und -ende individuelle Schallaufnehmer zu verwenden und diese fest zu installieren, wie das im Abschnitt 3.1.4 beschrieben worden ist.

In einer ersten Versuchsreihe wurden Messungen mit nur einem Detektorpaar durchgeführt, das sowohl am Anfang als auch am Ende der Rohrstrecke eingesetzt wurde und folglich nach jeder Temperaturerhöhung umgesetzt werden mußte. Infolge der schwer reproduzierbaren Ankoppelbedingungen wurden stark schwankende Meßergebnisse erzielt, auf deren Wiedergabe hier aus diesem Grund verzichtet wird.

Im Abschnitt 3.1.2 wurden zwei Druckstufen, 21 und 41 bar, angegeben, unter welchen Stickstoff aus dem Leck ausströmte, um die Ultraschallsignale zu erzeugen. Der Druck von 41 bar wurde für die eigentlichen Messungen am Rohrende gewählt, um ein möglichst hohes Signal zu erzielen. Für die Kontrollmessungen am Rohranfang mußte der niedrigere Druck von 21 bar eingestellt werden, weil bei 41 bar Schallsignale mit einer Intensität entstanden, die zu einer Übersteuerung der Schallaufnehmer am Rohranfang führten.

Die elektrischen Signale der Schallaufnehmer wurden im Frequenzbereich bis zu 500 kHz nach einer Bandfilterung mit dem rms-Voltmeter ausgewertet, oberhalb von 500 kHz wurden die Meßwerte aus den Spektrogrammen entnommen. Die eingestellten Filtergrenzen waren identisch mit denen aus Abschnitt 2, d.h. 20/30 kHz, 50/60 kHz, 90/110 kHz, 200/300 kHz und 400/600 kHz. In den unteren 4 Frequenzbereichen wurden die Signale der Detektoren der Baureihe D 9201 und ab 500 kHz die Signale der Detektoren D 9202 ausgewertet.

3.3 Meßergebnisse

3.3.1 Messungen am Rohranfang

In den Abb. 11, 12 und 13 sind die Messungen am Rohranfang wiedergegeben. Abb. 11 zeigt das bei Raumtemperatur und Abb. 12 das bei 800°C gemessene Spektrum. Die Spektren sind innerhalb statistischer Schwankungen identisch und bestätigen damit das be-

reits im Abschnitt 3.2 vorweggenommene Ergebnis, daß im Schallsignal am Rohranfang ein reflektierter Anteil nicht vorhanden ist.

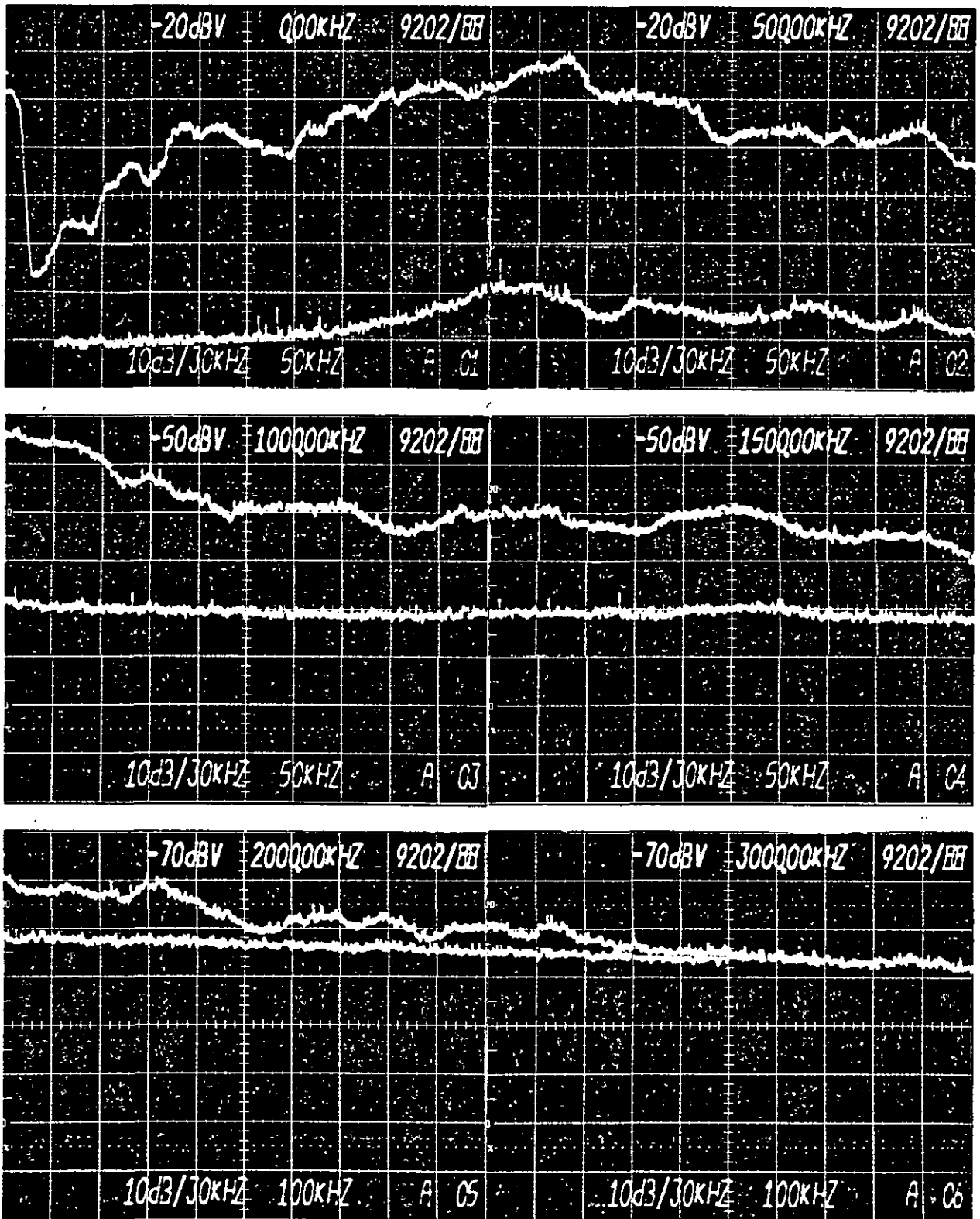


Abb. 11: Schallspektrum am Rohranfang bei Raumtemperatur
obere Kurven: Schallspektrum untere Kurven: Rauschpegel

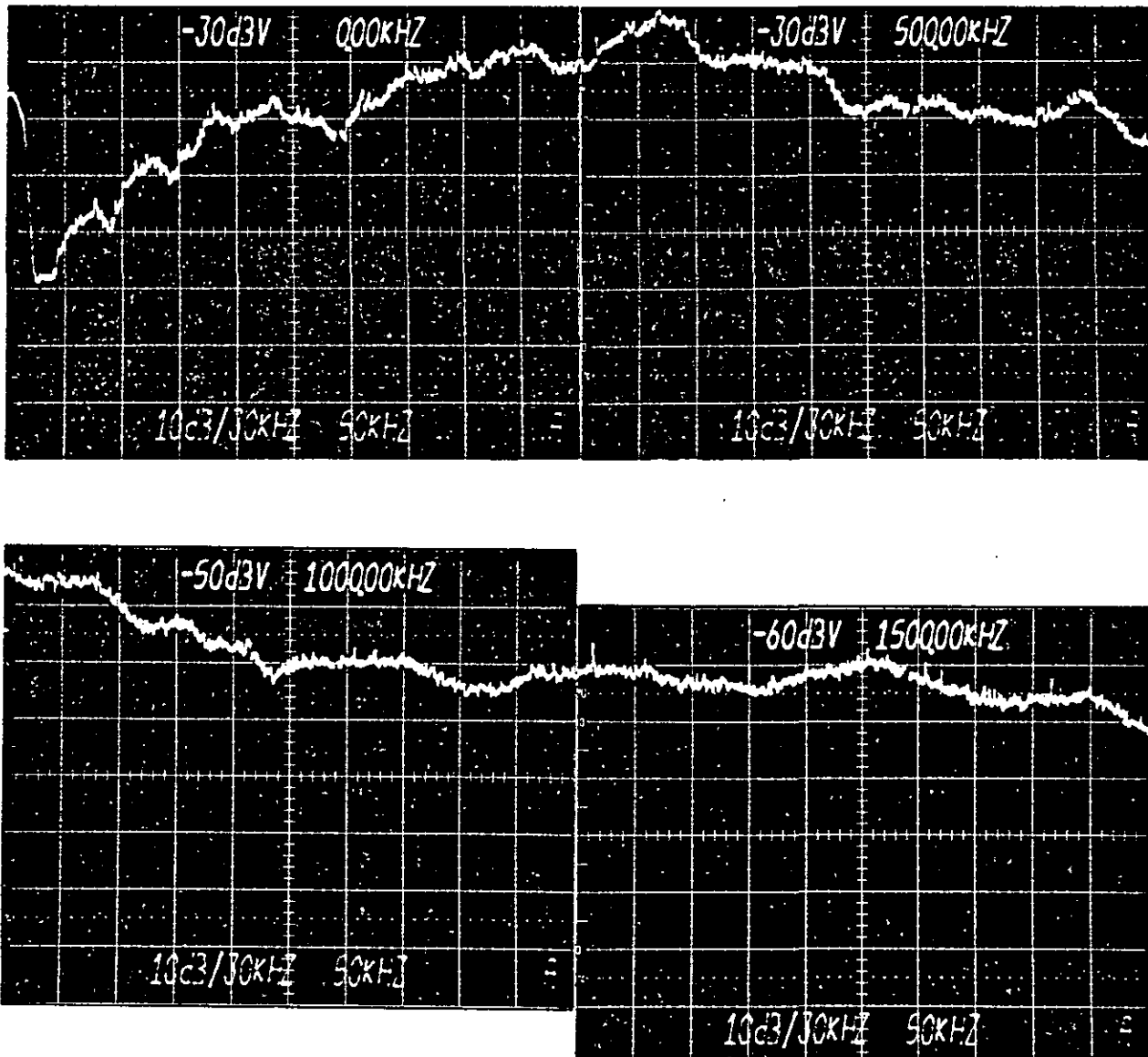


Abb. 12: Schallspektrum am Rohranfang bei 800°C

Dieses Ergebnis wird durch sämtliche Zwischenmessungen in den einzelnen Temperaturstufen entsprechend ergänzt.

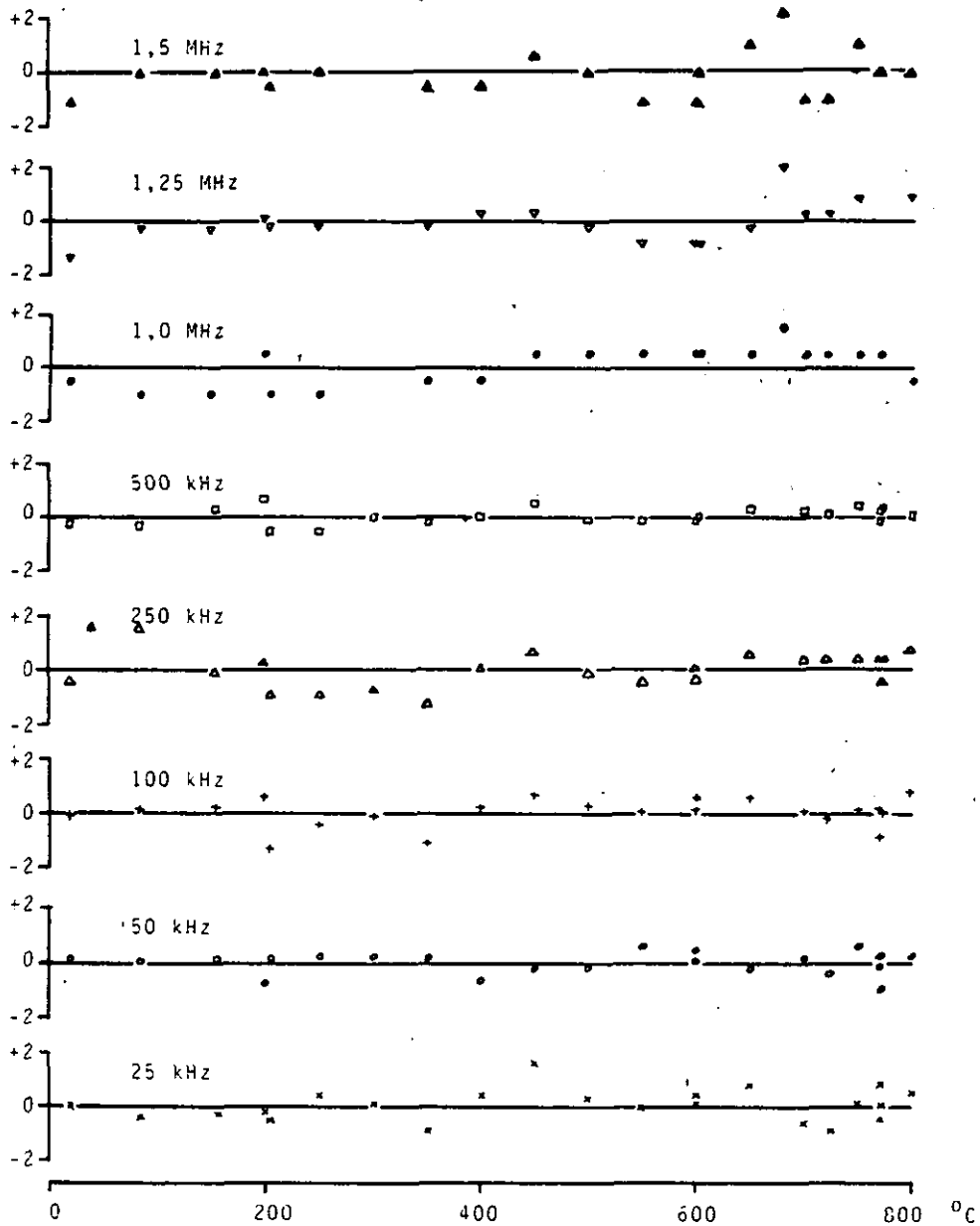


Abb. 13: Abweichungen des Signalpegels am Rohranfang vom Mittelwert in den als Parameter angegebenen Frequenzbereichen im Temperaturbereich von 20-800°C. Angaben in dB

Abb. 13 gibt die Resultate wieder. In Abb. 13 sind nicht die direkten Meßwerte dargestellt, da diese als rein zufällig anzusehen sind, sie ergeben sich aus dem individuellen Spektrum der Schallquelle und dem ebenso individuellen und zufällig gegebenen Übertragungsverhalten der Schallaufnehmer. Diese Werte sind daher in ihrer absoluten Höhe bedeutungslos. Stattdessen wurden die Abweichungen der Meßwerte vom Mittelwert in dB eingetragen. In keinem Spektralbereich ist eine signifikante Änderung der Signalthöhe mit steigender Temperatur feststellbar.

3.3.2 Messungen am Rohrende

Abb. 14 zeigt das Schallspektrum am Rohrende bei Raumtemperatur. Abb. 14 legt einen Vergleich mit dem am Rohranfang bei Raumtemperatur gemessenen Spektrum, Abb. 11, nahe. Dieser Vergleich kann aber wegen der individuellen Übertragungsfunktion der Schallaufnehmer und der unterschiedlichen Ankoppelbedingungen nur grob qualitativ sein, wobei außerdem zu berücksichtigen ist, daß die Aufzeichnung des Spektrums am Rohranfang mit halber Schallintensität erfolgte. Trotz dieser Vorbehalte ist deutlich die Abhängigkeit der Dämpfung von der Körperschallfrequenz zu erkennen.

Der Anstieg der Dämpfung im höherfrequenten Bereich hat zur Folge, daß oberhalb von 2 MHz kein auswertbares Signal am Rohrende vorhanden ist. Schon oberhalb von 1,3 MHz liegt der Signal-Rausch-Abstand unter 12 dB, wodurch die Auswertung erschwert bzw. der Fehler entsprechend erhöht wird.

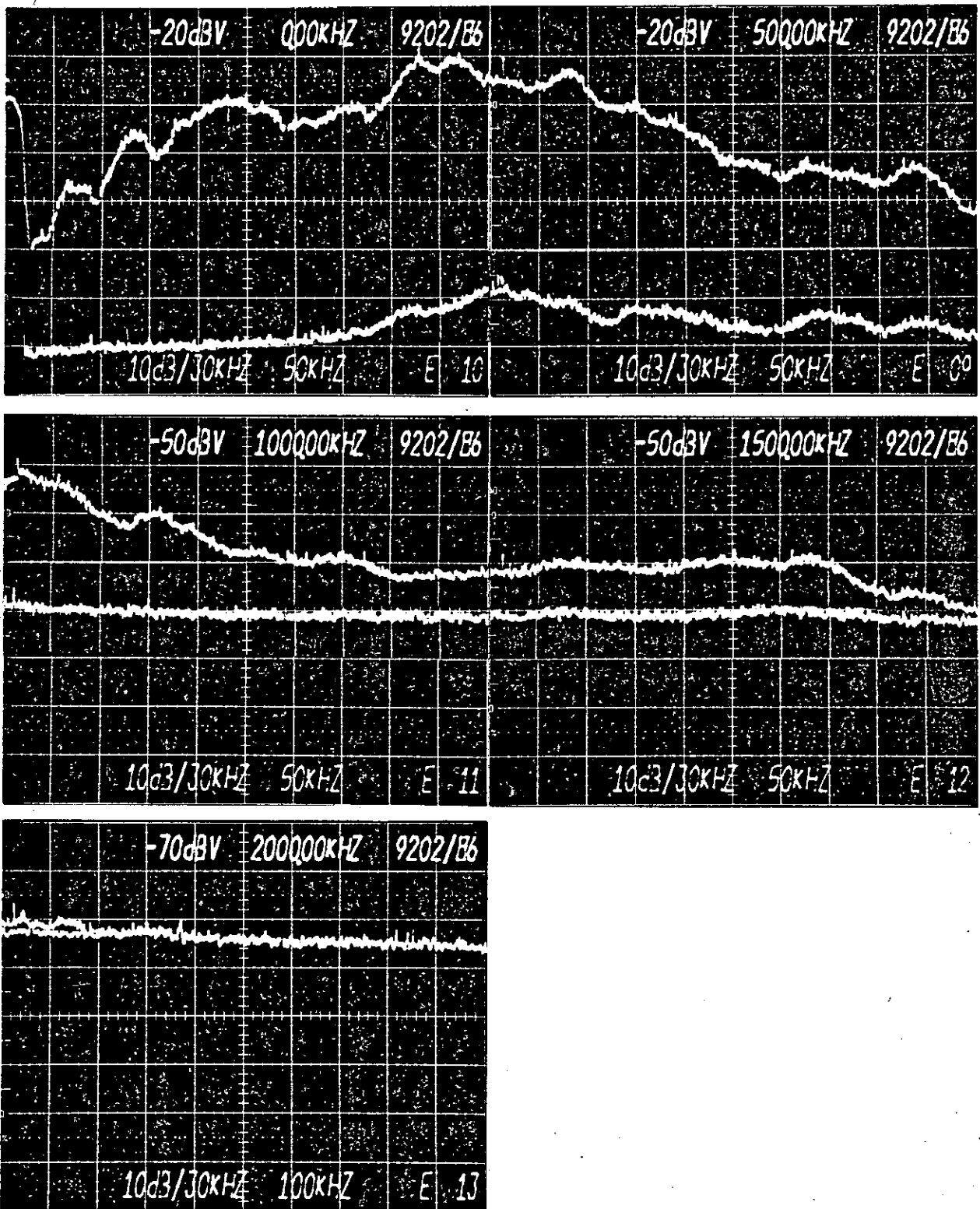


Abb. 14: Schallspektrum am Rohrende bei Raumtemperatur
 obere Kurve: Schallspektrum
 untere Kurve: Rauschspektrum

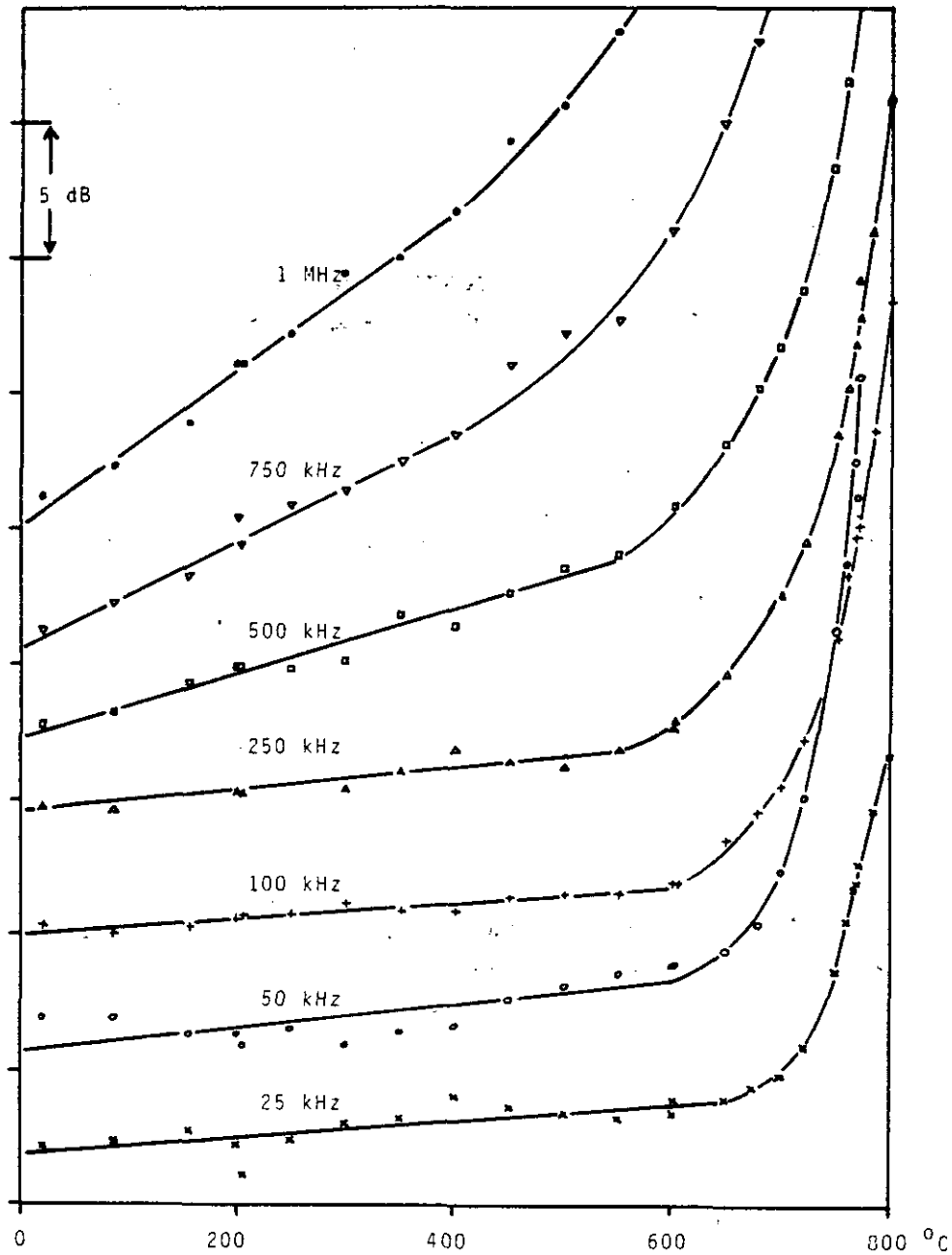


Abb. 15: Zunahme der Dämpfung in dem 6,5 m langen Rohr in Abhängigkeit von der Temperatur in verschiedenen Frequenzbereichen

Aus den Messungen am Rohrende kann unmittelbar die Zunahme der Dämpfung mit steigender Temperatur entnommen werden. Diese Ergebnisse sind in Abb. 15 zusammengefaßt. Da in diesem Experiment nur die relative Veränderung der Dämpfung, nicht aber der absolute Wert bestimmt werden konnte, fehlt aus diesem Grund in Abb. 15 eine absolute Skala der Ordinate, es wird nur der Maßstab angegeben, in welchem die Zunahme der Dämpfung aufgezeichnet ist. Für die in Abb. 15 dargestellten Werte ist die Bezugslänge die gesamte aufgeheizte Strecke, d.h. 6,5 m.

Als Folge der Relativmessungen konnte auch die Lage der Kurven in Abb. 15 völlig willkürlich gewählt werden.

Aus Abb. 15 können folgende Ergebnisse abgelesen werden:

1. Die Dämpfung steigt mit zunehmender Temperatur bis zu einer bestimmten Grenze in erster Näherung linear an. Oberhalb dieser Grenze wird ein wesentlich steilerer Anstieg der Dämpfung beobachtet.
2. Die Grenze, oberhalb derer ein steilerer Anstieg der Dämpfung zu verzeichnen ist, verlagert sich mit steigender Frequenz zu niedrigeren Temperaturen.
3. Die Zunahme der Dämpfung im linearen Bereich steigt mit der Frequenz des Körperschalls an.

Zur quantitativen Bestimmung der Dämpfungszunahme wurden zunächst die Anpassungsgeraden im linearen Bereich nach der Kleinstquadratmethode ermittelt. Diese Geraden sind bereits in Abb. 15 dargestellt. Infolge der sich mit steigender Frequenz verlagernden Temperaturgrenze, bis zu welcher ein linearer Anstieg beobachtet wurde, sind für diese Berechnungen für die Frequenzen von 25 - 100 kHz die Meßwerte bis zu 600°C, für die Frequenzen 250 und 500 kHz die Werte bis zu 550°C und für die Frequenzen von 750 kHz bis 1,5 MHz die Werte bis 400°C verwendet worden. Die Steigungsmaße der Anpassungsgeraden geben die frequenzabhängige Zunahme der Dämpfung an.

Es stellt sich die Frage, welcher quantitative Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Dämpfung und der Frequenz aus den Meßwerten abgeleitet werden kann. Dazu sind in Abb. 16 die Steigungsmaße als Funktion der Frequenz dargestellt. Die in Abb. 16

eingezeichneten Punkte stellen dabei Mittelwerte aus unterschiedlich gewonnenen Einzelergebnissen dar (rms-Spannungsmessung, Auswertung von Spektrogrammen).

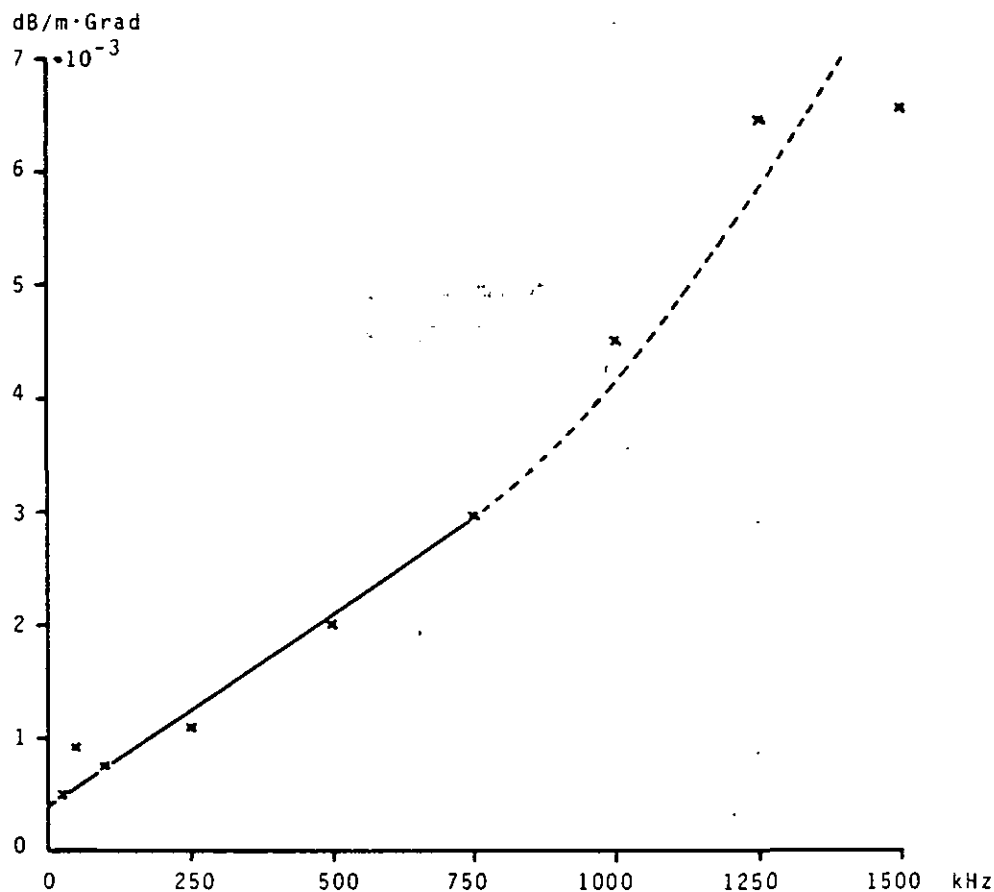


Abb. 16: Dämpfung als Funktion der Körperschallfrequenz

Aus Abb. 16 ist ersichtlich, daß man für den Anstieg der Dämpfung im Bereich bis zu 750 kHz erneut eine Gerade berechnen kann.

Aus diesen Werten fällt nur der Wert für 50 kHz deutlich heraus. Das zeigt sich bereits auch in Abb. 15. Da außerdem in Abschnitt 2 festgestellt wurde, daß für die Frequenz von 50 kHz ein im Vergleich zum gesamten übrigen Frequenzspektrum abweichendes Verhalten des Schallaufnehmers D 9201/AD44 hinsichtlich seiner maximalen Sensitivität auftrat, die nicht bei Ankopplung längs eines Durchmessers seiner sensitiven Fläche, sondern längs einer

Sekanten erzielt werden konnte, soll der Meßwert für 50 kHz hier unberücksichtigt bleiben.

Die nach der Kleinstquadratmethode berechnete Gerade G, die in Abb.16 eingezeichnet ist, hat die Gleichung:

$$(1) \quad G = 3,7 \cdot 10^{-4} + 3,4 \cdot 10^{-9} \nu \quad \text{dB/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

G gibt den Anstieg der Dämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz pro Grad Celsius und pro Länge in Metern an. Multipliziert man G mit der Temperatur, so erhält man innerhalb der obengenannten Temperaturgrenzen den frequenz- und temperaturabhängigen Anstieg der Dämpfung.

Mit dem in Abschnitt 2 ermittelten Absolutwert der Dämpfung bei Raumtemperatur erhält man schließlich den Absolutwert der Dämpfung als Funktion der Temperatur und Frequenz:

$$(2) \quad D [\text{dB}] = [3 \cdot 10^{-6} \nu + (3,7 \cdot 10^{-4} + 3,4 \cdot 10^{-9} \nu) \cdot (T-20)] \cdot l$$

ν in 1/Sekunde

T in $^\circ\text{Celsius}$

l in Metern:

Der Gültigkeitsbereich der Gleichung beschränkt sich für Körperschallfrequenzen bis zu 100 kHz auf den Temperaturbereich von 20° bis 600°C , für Frequenzen bis zu 500 kHz auf Temperaturen bis zu maximal 550°C und für 750 kHz auf maximal 400°C . Mit den hier angegebenen Frequenzen wird gleichzeitig der Spektralbereich angegeben, in welchem diese Gleichung benutzt werden darf. Stellt man Gleichung 2 graphisch dar, indem man die Dämpfung als Funktion der Temperatur mit der Körperschallfrequenz als Parameter zeichnet, so erhält man die in Abb. 17 wiedergegebene Kurvenschar, aus der direkt die frequenz- und temperaturabhängigen Dämpfungswerte entnommen werden können.

Um den Einfluß der Dämpfung auf die Signalhöhe unmittelbar zu zeigen, werden nachfolgend einige Spektren wiedergegeben, die am Rohrende gemessen wurden.

Die Abb. 18, 19 und 20 zeigen, wie mit steigender Temperatur zunächst im hochfrequenten Bereich das Signal nicht mehr vom Rauschpegel getrennt werden kann.

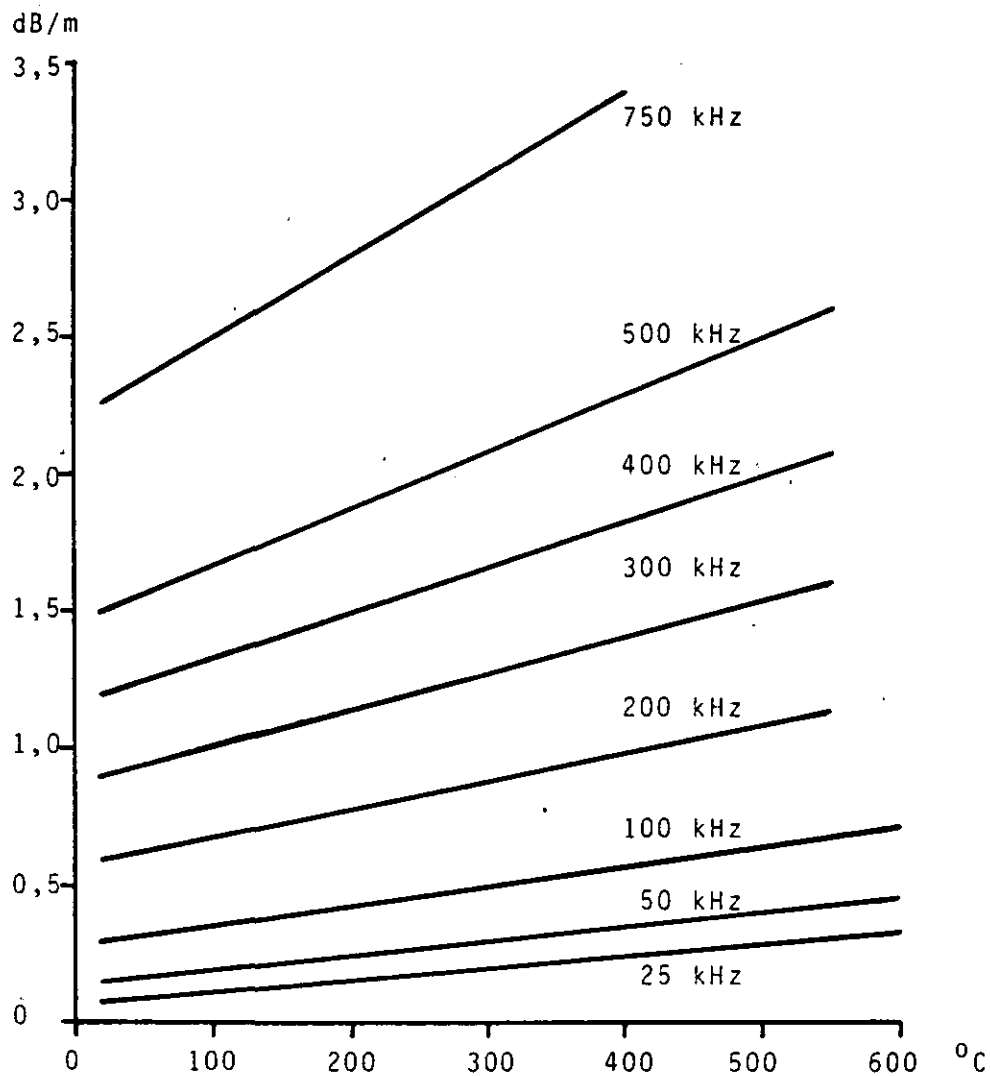


Abb. 17: Dämpfung als Funktion der Temperatur,
Körperschallfrequenz als Parameter
(graphische Darstellung der Gleichung (2))

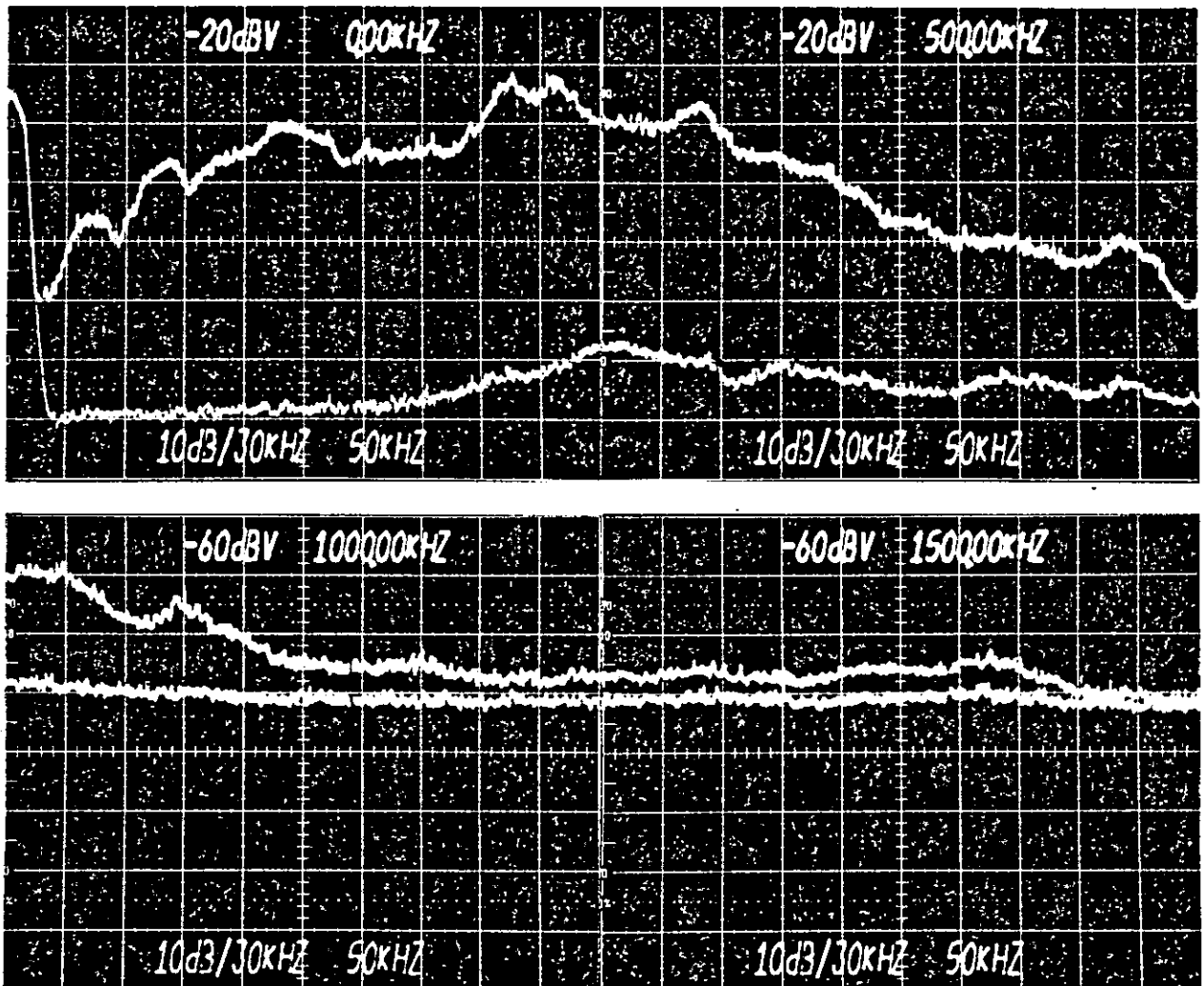


Abb. 18: Schallspektrum am Rohrende
Rohrtemperatur: 302°C,
obere Kurven: Schallspektrum
untere Kurven: Rauschpegel

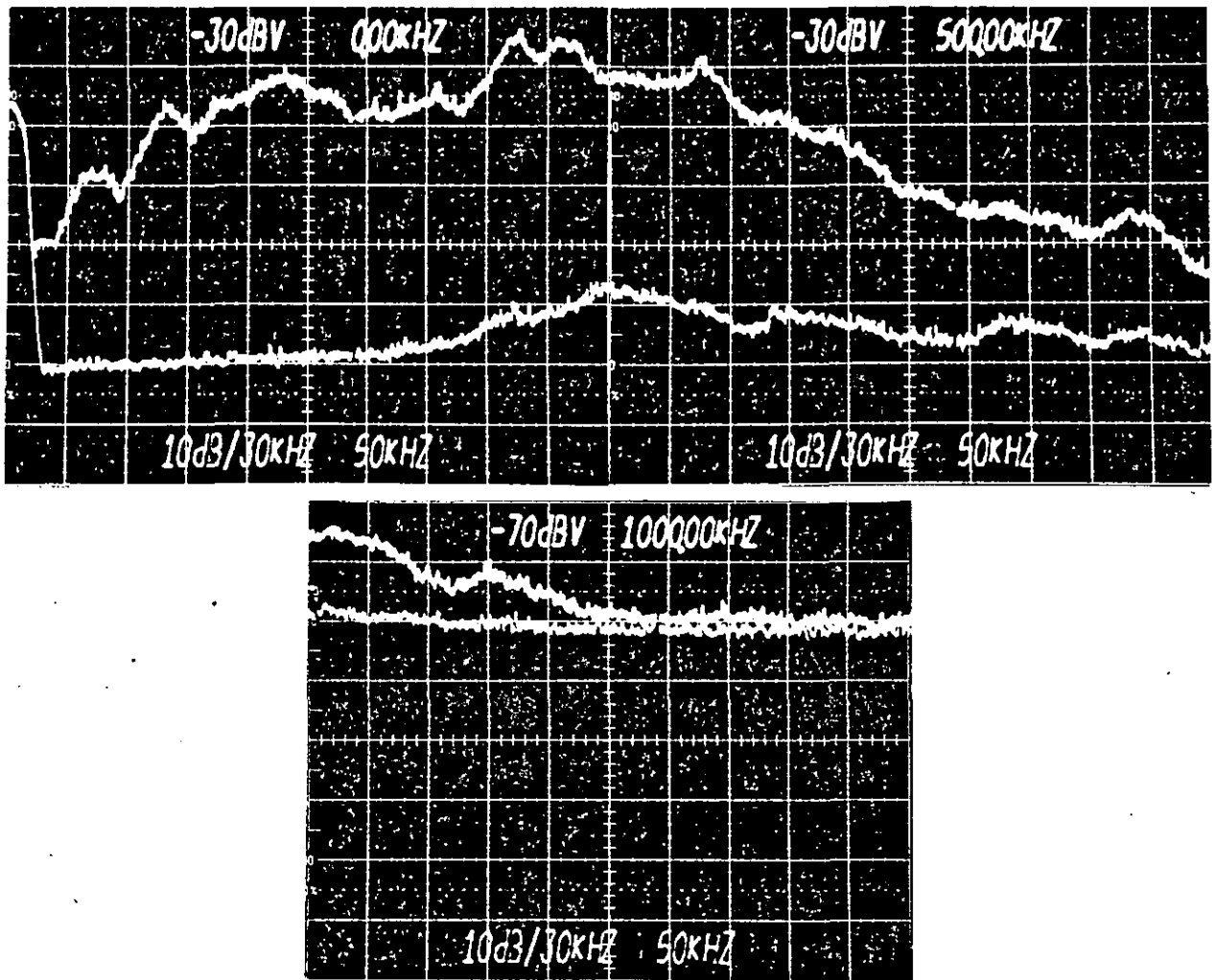


Abb. 19: Schallspektrum am Rohrende Rohrtemperatur 497°C
 obere Kurve: Schallspektrum untere Kurve: Rauschpegel

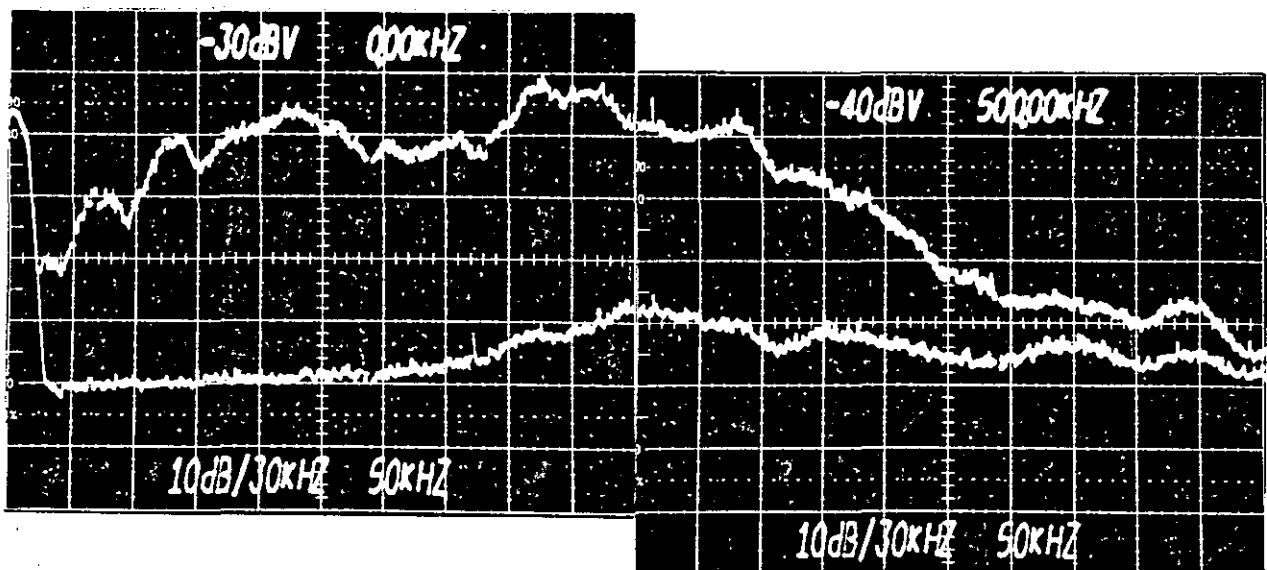


Abb. 20: Schallspektrum am Rohrende Rohrtemperatur 698°C
 obere Kurve: Schallspektrum untere Kurve: Rauschpegel

Der sehr steile Anstieg der Dämpfung im oberen Temperaturbereich wird insbesondere durch die Spektrogramme der Abb. 21 bis 25 dokumentiert, die oberhalb von 800°C aufgenommen wurden. Hier genügen bereits wenige Grad Temperaturerhöhung zu einer erheblichen Schwächung des Signals auch im niederfrequenten Bereich.

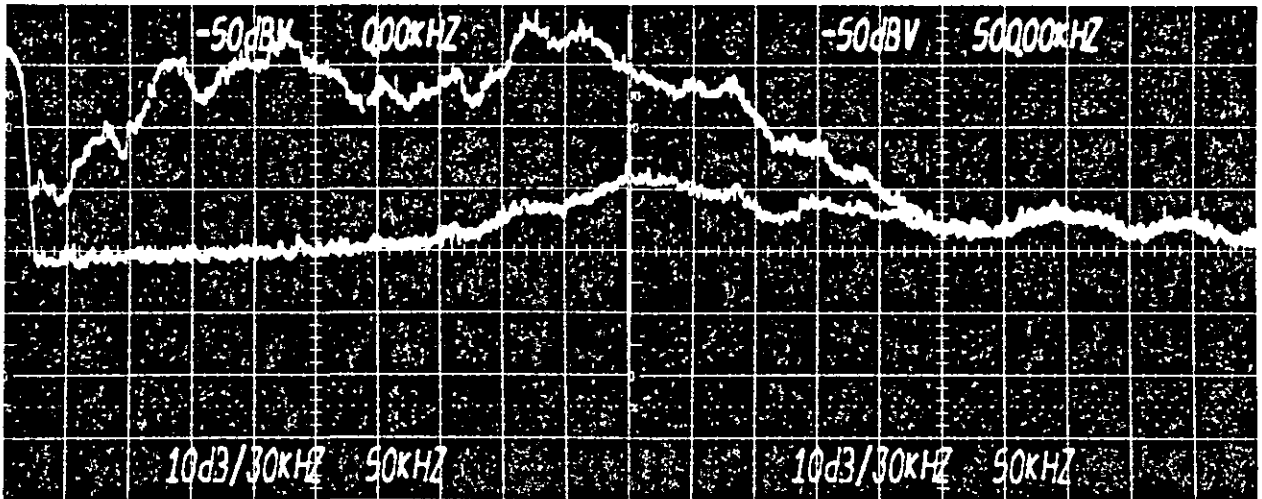


Abb. 21: Schallspektrum am Rohrende Rohrtemperatur 804°C
obere Kurve: Schallspektrum untere Kurve: Rauschpegel

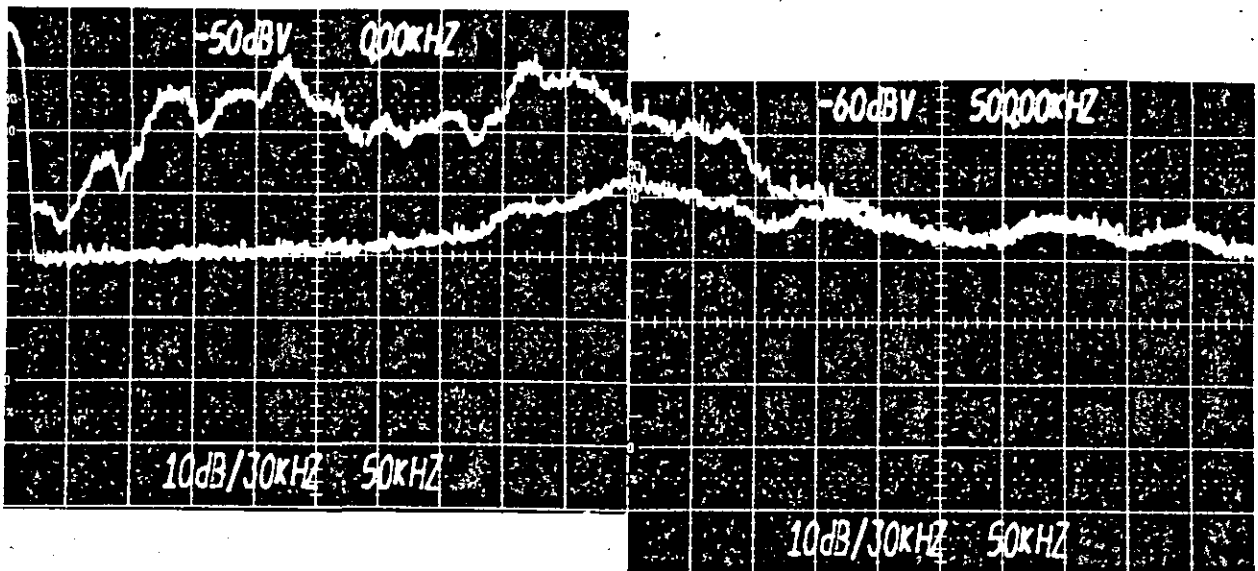


Abb. 22: Schallspektrum am Rohrende Rohrtemperatur 811°C
obere Kurve: Schallspektrum untere Kurve: Rauschpegel

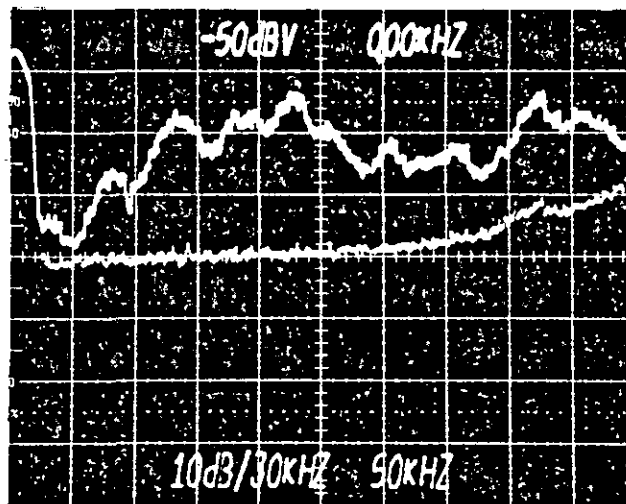


Abb. 23: Schallspektrum am Rohrende Rohrtemperatur $830^{\circ}\text{C} \pm 3,7^{\circ}\text{C}$
obere Kurve: Schallspektrum
untere Kurve: Rauschpegel

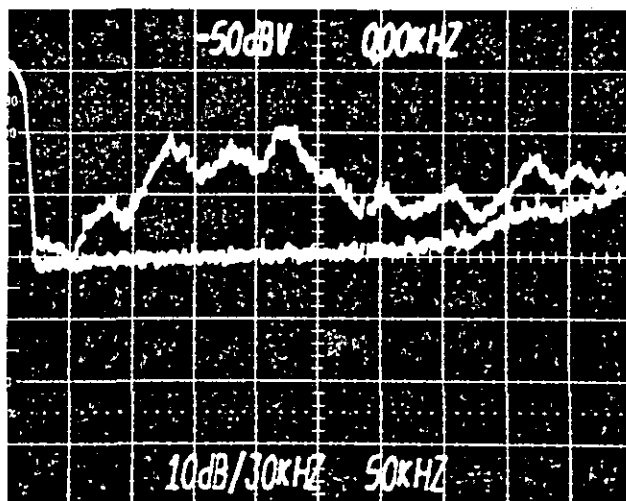


Abb. 24: Schallspektrum am Rohrende Rohrtemperatur $852^{\circ}\text{C} \pm 3,6^{\circ}\text{C}$
obere Kurve: Schallspektrum
untere Kurve: Rauschpegel

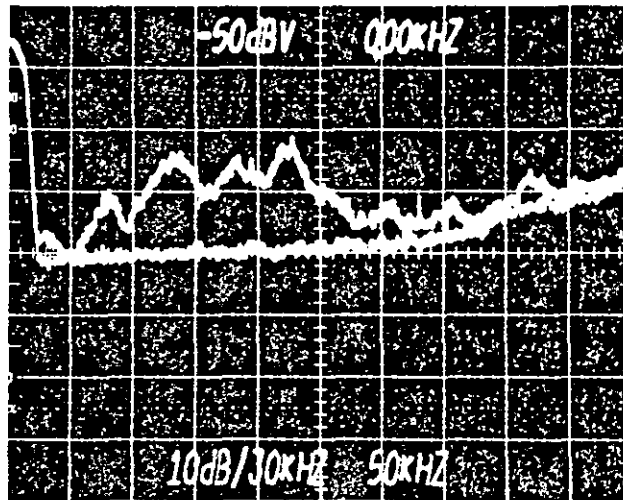


Abb. 25: Schallspektrum am Rohrende Rohrtemperatur $865^{\circ}\text{C} \pm 1,2^{\circ}\text{C}$
obere Kurve: Schallpegel
untere Kurve: Rauschpegel

4. FOLGERUNGEN

Hinsichtlich der eingangs gestellten Frage lassen Gleichung 2 bzw. Abb. 17 erkennen, daß die Reichweite eines Schallaufnehmers, d.h. der Abstand, in welchem ein Leck bestimmter Größe erfaßt werden kann, nicht nur von der Körperschallfrequenz, sondern auch von der Temperatur des Dampferzeugerrohres beeinflußt wird.

Die frequenzabhängige Dämpfung verlangt zwecks hoher Reichweiten die Auswertung des Schallsignals in einem möglichst niedrigen Frequenzbereich. Gerade in diesem Bereich, d.h. um und unter 100 kHz, ist aber die Zunahme der Dämpfung - relativ gesehen - besonders groß. Die Dämpfung steigt bei einer Temperaturerhöhung von 20 auf 500°C für eine Frequenz von 100 kHz um den Faktor 2,1 und für 25 kHz um den Faktor 3,9.

Neben dem im niederfrequenten Bereich vorhandenen Störpegel, hervorgerufen durch das normale Betriebsgeräusch eines DE, bedeutet der temperaturbedingte Dämpfungsanstieg eine weitere Einschränkung eines Leckmonitierungssystems an einem einzelnen DE-Rohr unter Betriebsbedingungen. Eine individuelle Rohrinstrumentierung zwecks Zuordnung des Lecks zu einem bestimmten Strang kann daher nur für Messungen im abgeschalteten Zustand diskutiert werden.

5. LITERATUR

- /1/ U. Boltendahl, Wärmetransport auf kaltem Wege
R. Harth Bild der Wissenschaft
Band 17, Heft 4, 44-55, April 1980
- /2/ Firma Datenblätter zu den Körperschall-
DUNEGAN-ENDEVCO detektoren D 9201 und D 9202

6. ANHANG

Erklärung der Darstellungsweise der Spektrogramme

Die Versuchsergebnisse werden in einigen Fällen durch Oszillogramme belegt, die nicht umgezeichnet worden sind, sondern in der originalen Form erscheinen. Aus diesem Grund fehlt in den Darstellungen eine direkte Bezeichnung der Achsen.

In den Spektrogrammen kann die Einteilung der Frequenz- und Signalachse aus den in den Oszillogrammen vorhandenen Einblendungen entnommen werden. Die Darstellungsweise der Spektrogramme und der in den Oszillogrammen vorhandenen Einblendungen wird durch Abb. 26 erklärt.

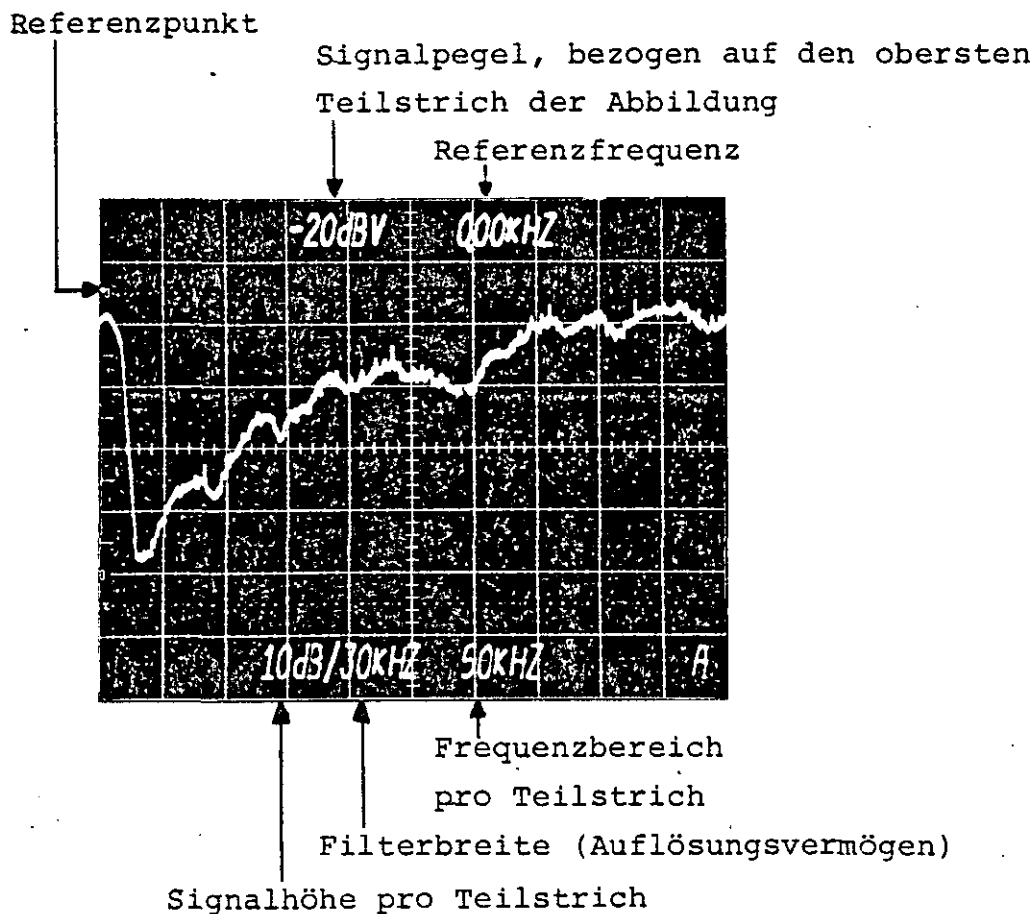


Abb. 26: Darstellungsweise der Spektrogramme

In allen dargestellten Spektren liegt der Referenzpunkt auf der linken Begrenzungslinie der Spektrogramme bzw. ein zweiter Referenzpunkt auf der Mittellinie bei zusammengesetzten Spektrogrammen. Der sich an die Referenzfrequenz anschließende Frequenzbereich wird durch die Einblendung "Frequenzbereich pro Teilstrich" definiert. In dem in Abb.26 wiedergegebenen Beispiel liegt die Referenzfrequenz bei 0,00 kHz, der Frequenzbereich pro Teilstrich beträgt 50 kHz. Folglich wird in Abb.26 ein Frequenzbereich von 0 bis 500 kHz wiedergegeben, und zwar mit einem Auflösungsvermögen von 30 kHz, angezeigt als "Filterbreite" des Spektralanalysators.

Die Signalthöhe der Spektren wird ebenfalls durch zwei Einblendungen definiert, und zwar durch den "Signalpegel, bezogen auf den obersten Teilstrich der Abbildung", und durch die "Signalthöhe pro Teilstrich". In der Abb. 26 entspricht der oberste Teilstrich einer Signalthöhe von -20 dBV, mit jedem niedrigeren Teilstrich nimmt der Signalpegel um 10 dBV ab.